

Б. С. ПОЗДНЯКОВ,
Е. А. КОПТЕЛОВ

ТЕРМО- ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГЕТИКА

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Принятые обозначения и сокращения	5
Г л а в а 1. Из истории развития термоэлектрических генераторов	7
Г л а в а 2. Расчеты термоэлементов	14
§ 2.1. Основные термоэлектрические явления	14
§ 2.2. Баланс энергии в ТЭЭЛ	17
§ 2.3. Оптимизация к. п. д. простейшего ТЭЭЛ	24
§ 2.4. ТЭЭЛ с переменным составом ветвей	28
§ 2.5. Расчет ТЭЭЛ	34
Г л а в а 3. Схемы установок ТЭГ	39
§ 3.1. Тепловая эффективность установок ТЭГ	39
§ 3.2. ТЭГ с рекуперацией тепла	40
§ 3.3. ТЭГ для получения переменного тока	42
§ 3.4. ТЭГ с пониженной температурой холодных спаев	44
§ 3.5. Короткозамкнутый ТЭГ	47
§ 3.6. Термоэлектрический насос	48
§ 3.7. ТЭГ в сочетании с термоэлектрическим холодильником	49
§ 3.8. ТЭГ в сочетании с фотоэлементами, термоэмиссионными диодами и паровым циклом	51
Г л а в а 4. Термоэлектрические материалы	53
§ 4.1. Общая часть	53
§ 4.2. Твердые термоэлектрические материалы	56
§ 4.3. Некоторые вопросы изготовления твердых термоэлектриков	68
§ 4.4. Жидкие термоэлектрические материалы	70
§ 4.5. Действие ядерных излучений на термоэлектрические материалы	73
Г л а в а 5. Конструктивные схемы и особенности ТЭЭЛ	79
§ 5.1. Конструктивные схемы ТЭЭЛ	79
§ 5.2. Температурные поля и напряжения в ТЭЭЛ	93
§ 5.3. Контактные сопротивления	95
§ 5.4. Электрическая изоляция батарей ТЭЭЛ	102
§ 5.5. Старение и сублимация ТЭЭЛ	103
§ 5.6. Удельная мощность ТЭЭЛ	106
§ 5.7. Надежность работы батарей ТЭЭЛ	107

Г л а в а 6. ТЭГ на химическом (органическом) топливе, солнечной энергии и некоторых других источниках тепла	109
§ 6.1. Общая часть	109
§ 6.2. ТЭГ на твердом топливе	110
§ 6.3. ТЭГ на жидком топливе	114
§ 6.4. ТЭГ на газообразном топливе	125
§ 6.5. ТЭГ на солнечной энергии (без концентраторов)	128
§ 6.6. Солнечные ТЭГ с концентраторами	131
§ 6.7. ТЭГ с некоторыми другими источниками тепла	139

Г л а в а 7. Радиоизотопные термоэлектрические генераторы	142
--	------------

§ 7.1. Радиоизотопная энергетика	142
§ 7.2. Радиоактивные изотопы как источники тепла	145
§ 7.3. Конструктивные особенности изотопных термогенераторов	152
§ 7.4. Наземные изотопные термогенераторы	165
§ 7.5. Изотопные термогенераторы для космоса	181

Г л а в а 8. Реакторные термогенераторы	203
--	------------

§ 8.1. Общая часть	203
§ 8.2. Реакторные установки с термоэлектрическим циклом	204
§ 8.3. Реакторные термогенераторы космического назначения	217
§ 8.4. Реакторные термогенераторы для работы под водой	240

Список литературы	250
-----------------------------	-----

Поздняков Б. С., Коптелов Е. А. **Термоэлектрическая энергетика.** М., Атомиздат, 1974 г., 264 с.

В книге освещается история развития термоэлектрического метода прямого преобразования тепловой энергии в электрическую и дается инженерный обзор состояния этой проблемы в настоящее время. Характеризуется физика термоэлектрических явлений и описываются способы расчета термоэлементов. Приводится таблица характеристик большого количества термоэлектрических материалов. Указываются существенные конструктивные особенности термоэлектрических батарей. Описываются конкретные конструкции термоэлектрических генераторов на твердом, жидком и газообразном топливе, на изотопных источниках тепла и с ядерными реакторами.

Рисунков 120. Таблиц 47. Библиография 259 назв.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В условиях современного широкого использования электрической энергии традиционные способы получения электричества с помощью паросилового цикла не могут в достаточной мере удовлетворить растущие потребности. Возникший в связи с этим интерес к методам прямого преобразования тепловой энергии в электрическую привел к изучению и разработке термоэлектрических и термоэмиссионных генераторов, МГД-установок и других систем.

В этой книге рассматриваются термоэлектрические методы прямого получения электрического тока. Термоэлектрические генераторы обладают специфическими особенностями, делающими их незаменимыми во многих случаях. К таким особенностям относится отсутствие движущихся частей, что, в частности, допускает использование более высоких температур цикла. Нет также необходимости в применении высоких давлений жидкостей или газов в основной схеме, поскольку цикл осуществляется посредством явлений, происходящих в самом термоэлектрическом материале. Термоэлектрические генераторы можно использовать при больших и малых перепадах температур, а также при низких и высоких температурах, т. е. термоэлектрический цикл универсален, он допускает использование практически любых источников тепла.

Расход термоэлектрических материалов может быть небольшим, так как к. п. д. термоэлемента теоретически не зависит от размеров, но связан со способами подвода тепла, с контактными сопротивлениями и другими конструктивными особенностями. Управление термоэлектрическим генератором может быть сведено только к регулированию подачи топлива, так как в принципиальной части схемы нет машин и механизмов. Это облегчает создание автоматически работающих электростанций.

Термоэлектрические явления были открыты в первой половине прошлого века. Однако они не получили тогда применения в энергетике из-за низкой тепловой экономичности.

В настоящее время применение полупроводников и слоистых термоэлементов может обеспечить использование тепла с к. п. д. до 10—20% и более. Существенный вклад в развитие термоэлектрического метода внесли советские ученые.

Развитие атомной энергетики расширило сферы применения термоэлектрических генераторов. С конца пятидесятих годов стали разрабатываться и осуществляться термоэлектрические генераторы, использующие тепло распада радиоактивных изотопов и энергию деления урана в ядерных реакторах. Такие энергетические установки небольшой мощности нашли применение в космических аппаратах, работающих в отрыве от земных энергетических ресурсов, в морском деле (маяки, метеорологические станции) и в других областях техники. В 1964 г. в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова был пущен первый в мире ядерный реактор с термоэлектрическим генератором тока мощностью 500 *вт*. В начале семидесятих годов обсуждаются атомные термоэлектрические установки мощностью в десятки, сотни и тысячи киловатт.

За последнее десятилетие опубликовано значительное количество работ, описывающих результаты научных исследований в области термоэлектрической энергетики, конструкции, методы расчетов ТЭГ, применяемые термоэлектрические материалы и т. д.

В этой книге авторы делают попытку систематизировать опубликованный материал. Здесь не затрагиваются вопросы использования термоэлектрического метода для получения холода и тепла, термометрия, измерительная техника и другие области использования термоэлектрических явлений, а также известные иные методы прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. Книга содержит справочные сведения и дает обзор современного состояния термоэлектрической энергетики. Она предназначена для инженеров, конструкторов и работников исследовательских и проектных организаций, а также для студентов высших учебных заведений соответствующих специальностей. Некоторые вопросы, косвенно касающиеся данной темы, в книге только упомянуты, но они, по мнению авторов, необходимы для полноты общего представления. Предполагается, что в случае более глубокого изучения может быть использована литература, указанная в конце книги.

Авторы выражают благодарность В. А. Усову, А. М. Иванову, С. П. Лалыкину, Г. М. Фрадкину, В. А. Кремневу за полезные советы и ценные замечания, сделанные при просмотре рукописи и подготовке ее к печати. Авторы будут благодарны читателям за критические замечания и пожелания, способствующие устранению недостатков книги.

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- ППТЭ — прямое преобразование тепловой энергии в электрическую.
 ТЭГ — термоэлектрический генератор (включая термоэлектрические элементы, подвод к ним тепла и охлаждение).
 ТЭЭЛ — термоэлектрический элемент (две ветви), термопара.
 Батарея ТЭЭЛ — группа соединенных непосредственно ТЭЭЛ.
 Каскадный ТЭГ (или каскадная батарея) — ТЭГ или батарея ТЭЭЛ, в которых часть ТЭЭЛ получает тепло от холодных концов другой части ТЭЭЛ.
 Слоистый ТЭЭЛ — термоэлектрический элемент, в котором ветви имеют переменный по длине ветви состав термоэлектрического материала или состоят из нескольких слоев различных термоэлектрических материалов, через которые последовательно проходят тепло и электрический ток.
 ТЭМ — термоэлектрический материал (сокращенно термоэлектрик).
 n -проводник — электронная проводимость.
 p -проводник — дырочная проводимость.
 $\mathcal{E}$, d , c — электродвижущая сила, v
 ТЭДС — термоэлектродвижущая сила, v .
 ЯР — ядерный реактор.
 $\tau_{\text{вэл}}$ — тепловыделяющий элемент.
 АЭС — атомная электрическая станция.
 $T_{\text{г}}$, $t_{\text{г}}$ — температура горячего спая ТЭЭЛ (соответственно $^{\circ}\text{K}$ и $^{\circ}\text{C}$).
 $T_{\text{х}}$, $t_{\text{х}}$ — температура холодного спая ТЭЭЛ (соответственно $^{\circ}\text{K}$ и $^{\circ}\text{C}$).
 α — удельная ТЭДС, коэффициент Зеебека, $v/град$.
 π — коэффициент Пельтье, v .
 τ — коэффициент Томсона, $v/град$.
 E — разность потенциалов, v .
 I — электрический ток, a .
 ρ — удельное электрическое сопротивление, $ом \cdot см$.
 σ — удельная электрическая проводимость, $(ом \cdot см)^{-1}$.
 R — электрическое сопротивление внешней цепи ТЭЭЛ, $ом$.
 r — электрическое сопротивление собственно ТЭЭЛ (обеих ветвей), $ом$.
 κ — коэффициент теплопроводности, $вт/(см \cdot град)$.
 K — теплоемкость ТЭЭЛ, $вт/град$.
 Q — количество тепла.
 Z — добротность ТЭЭЛ, $град^{-1}$, $Z = \alpha^2/(\rho\kappa)$.

m — отношение электрического сопротивления внешней цепи к электрическому сопротивлению ТЭЭЛ, т. е. $m = R/r$.
 M — частный случай m при максимальном значении к. п. д. ТЭЭЛ.
 s — площадь сечения ветви ТЭЭЛ.
 l — длина участка ТЭЭЛ, занятого ТЭМ.
 W — мощность электрическая.
 η — коэффициент полезного действия (к. п. д.).
 η_K — к. п. д. цикла Карно, $\eta_K = (T_H - T_X)/T_H$.
 η_T — к. п. д. термоэлемента, $\eta_T = \eta_K \eta_z$.
 η_z — к. п. д., характеризующий ТЭМ, $\eta_z = \eta_T/\eta_K$.
 η_{II} — к. п. д., характеризующий эффективность подвода тепла топлива к горячим спаям ТЭЭЛ.
 η_{Σ} — общий к. п. д. преобразования тепла топлива в электроэнергию используемую в сети полезной нагрузки, $\eta_{\Sigma} = \eta_K \cdot \eta_z \cdot \eta_{II}$.

ГЛАВА 1

ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ

История изучения термоэлектрических явлений насчитывает немногим более 200 лет. Первой научной работой в этой области можно считать исследования, выполненные петербургским академиком Ф. Эпинусом в 1762 г. Он продолжил работы, проводившиеся до него М. В. Ломоносовым и Г. Рихманом в области изучения электрических явлений. Термоэлектрические явления (пироэлектричество) были описаны им в обстоятельном труде «Мемуар, содержащий точное описание опытов с турмалином», изданном в 1762 г. В работе описаны явления, возникающие при нагревании турмалина, и, в частности, дается описание пироэлектрического маятника, схема которого показана на рис. 1.1. Пробковый шарик совершал движение в результате воздействия электрического потенциала поверхностей нагретого турмалина. Шарик притягивался к одному из электродов, заряжался, отталкивался и притягивался к другому электроду и т. д. «Это попеременное притягивание и отталкивание продолжалось обыкновенно весьма долго и часто даже более часу», — отмечал Ф. Эпинус [1].

Указанные опыты — первые попытки прямого получения электричества посредством простого нагревания материалов. Приоритет в открытии термоэлектрических явлений принадлежит Ф. Эпинусу [2].

В 1822—1823 гг. немецкий физик Зеебек описал в «Известиях прусской академии наук» явление, которое он определил как появление свободного магнетизма, заключавшееся в том, что в цепи, состоящей из нескольких спаянных между собою различных материалов, при нагревании и охлаждении соответствующих спаев появляется электрический ток [3, 4]. Зеебек на большом количестве различных материалов сопоставил воздействие на магнитную стрел-

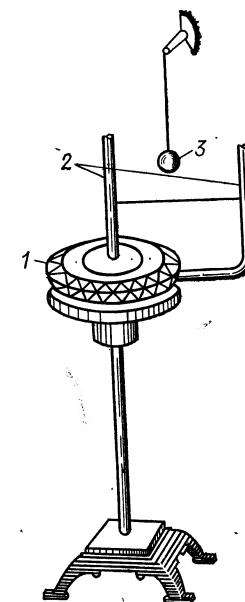


Рис. 1.1. Схема термоэлектрического маятника Эпинуса:

1 — турмалин; 2 — электроды из латуни; 3 — шарик из пробки.

ку проводников, спаянные концы которых имели разные температуры, и составил обширный термоэлектрический ряд. Измеренные Зеебеком значения ТЭДС материалов в общем соответствуют современным данным.

Первые термоэлектрические батареи построили Эрстед и Фурье (1823 г.) [5, 6]. Батарея Эрстеда и Фурье состояла из висмутовых и сурьмяных палочек, спаянных между собою (рис. 1.2). Один спай висмута с сурьмой нагревался до 200°C с помощью горелок, а другой охлаждался в результате погружения в лёд конца висмутовой пластинки. Так получилась батарея последовательно соединенных термоэлементов с чередующимися холодными и горячими спаями (см. рис. 1.2) [6].

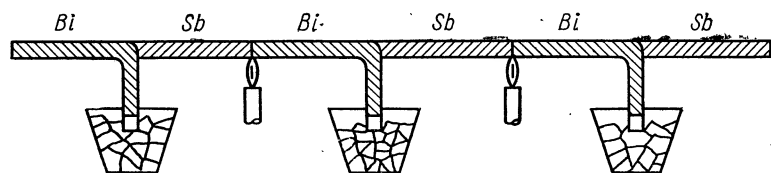


Рис. 1.2. Первая термоэлектрическая батарея Эрстеда и Фурье.

В 1834 г. часовщик Пельтье опубликовал статью о температурных аномалиях, наблюдаемых вблизи границы двух различных проводников при прохождении через них электрического тока [3, 7].

Однако природа этих явлений была выяснена позднее в результате опытов, проведенных в 1838 г. академиком Российской Академии наук Э. Х. Ленцем. В углубление на стыке стержней из висмута и сурьмы Ленц поместил каплю воды, которая замерзала при прохождении тока в одном направлении и таяла при противоположном направлении [3]. После этих опытов стало ясно, что при прохождении электрического тока на стыке двух разнородных проводников выделяется или поглощается тепло в зависимости от направления тока. Это явление, впервые обнаруженное Пельтье, получило название *эффекта Пельтье* [3, 8, 9].

В 1854 г. У. Томсон (лорд Кельвин) опубликовал предложенную им теорию термоэлектрических явлений, основанную на принципах термодинамики [10]. Он показал связь явлений Зеебека и Пельтье и необходимость (тогда еще не открытую) поглощения или выделения тепла вдоль проводника с током, имеющего градиент температуры. Это термоэлектрическое явление было экспериментально продемонстрировано Леру в 1867 г. и известно теперь как *эффект Томсона* [11].

Профессор Киевского университета М. П. Авенариус исследовал зависимость ТЭДС от температуры и показал, что для многих термопар ТЭДС изменяется с температурой по параболическому закону. Многочисленные проверки выводов М. П. Авенариуса показали справедливость их для нормальных и высоких температур [12].

Позднее были уточнены некоторые константы и предложены диаграммы для определения ТЭДС, построенные в соответствии с формулами Авенариуса, исходя из того, что ТЭДС пары металлов равна разности ТЭДС пар, полученных при соединении каждого из металлов порознь с произвольным третьим материалом, при тех же температурах.

В конце семидесятых годов прошлого века Беккерель создал высокотемпературную термоэлектрическую батарею из сернистой меди (температура плавления более 1000°C) в паре с мельхиором, дававшую большую ТЭДС.

В 1886 г. Ле Шателье предложил тугоплавкий термоэлемент из платины с платинородием для измерения высоких температур. Различные термопары для измерения температур в настоящее время широко применяются в промышленности и в науке.

В 1879 г. физик Холл открыл явление, получившее название *эффекта Холла* и заключающееся в отклонении магнитным полем электронов в проводнике с током перпендикулярно направлению тока и поля. В 1886—1887 гг. была открыта группа термомагнитных явлений, которые проявляются в проводнике, находящемся в магнитном поле и имеющем градиент температуры. Здесь возникает поперечная разность потенциалов и поперечная разность температур, продольная разность потенциалов и температур — *эффекты Нернста — Эттингсгаузена, Маджии, Риги — Ледюка* [13]. В 1936 г. советский физик И. К. Кикоин показал, что электродвижущая сила эффекта Холла определяется не вектором напряженности магнитного поля, а вектором намагничивания проводника [10].

В 1885 г. лорд Рэлей поставил задачу о термоэлектрическом генераторе и вычислил его к. п. д., который оказался очень малым по сравнению с к. п. д. существовавших паровых машин; поэтому тогда использование ТЭГ казалось неперспективным.

В 1893 г. русский астроном В. К. Церасский построил первый солнечный термоэлектрический генератор. Термоэлементы были изготовлены из сплава цинка с сурьмой (положительная ветвь) и нейзильбера (отрицательная ветвь). Генератор приводил в действие электрический звонок. Подробное сообщение об этом устройстве было опубликовано в «Русском астрономическом календаре» [14].

В восьмидесятые и девяностые годы проблему термоэлектрических устройств изучали многие исследователи в России. Среди них П. И. Бахметьев, В. В. Скобелыцын, Б. Л. Розинг, О. Д. Хвольсон и др. В те годы маломощные термоэлектрические генераторы применялись в небольшом количестве (главным образом в гальванотехнике).

К числу наиболее распространенных в Австрии и Германии батарей для гальванотехники относится ТЭГ, предложенный Ноэ. В этой батарее каждая из двух газовых горелок нагревала по двадцать ТЭЭЛ из мельхиора или нейзильбера (отрицательная ветвь) и сплава сурьмы и цинка (положительная ветвь). Тепло к горячим спаям подводилось с помощью медных стержней, нагреваемых га-

зовым пламенем. Холодные спаи охлаждались окружающим воздухом с помощью медных цилиндров.

В 1879 г. Кламон предложил более крупные термобатареи, в которых для нагревания спаев предусматривалось сжигание угля или кокса. На рис. 1.3 показана схема одного из ТЭГ Кламона. Батарея состоит из 3000 ТЭЭЛ, собранных в 60 блоков, по 50 ТЭЭЛ в каждом. Для отрицательной ветви предусматривалось использование

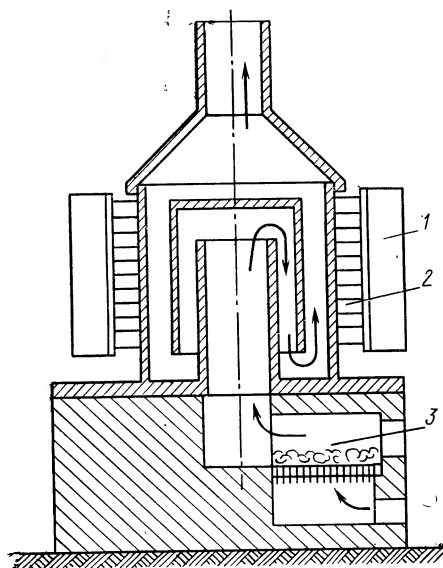


Рис. 1.3. Схема термоэлектрогенератора Кламона:

1 — охлаждающие ребра; 2 — термоэлементы; 3 — угольная топка.

сплава из висмута и сурьмы в виде четырехгранных призм, которые соединялись железной арматурой, служившей одновременно положительной ветвью ТЭЭЛ. Блок из 50 ТЭЭЛ изготовлялся заливанием сплава в специальную форму с вмонтированной железной арматурой. Эти блоки, расположенные вертикально, прижимались к чугунной трубе нагревателя. В качестве электрической изоляции использовалась слюда, охлаждался блок с помощью медных пластинок.

Помимо указанных выше ТЭГ, созданных Ноз и Кламоном, известны термобатареи, построенные Маркусом, Фермером, Беккерелем и др. Однако они не нашли промышленного применения и использовались только в лабораториях [15].

В начале XX века наибольшую известность приобрели термобатареи Гюльхера и динафор (генератор тока) Хейля.

Батарея Гюльхера, показанная на рис. 1.4, состояла из термопар, укрепленных в два ряда на шиферной пластинке и соединенных последовательно. Каждая из них представляет собою трубку из никеля, являющуюся одновременно одной из ветвей термоэлемента и газовой горелкой, нагревающей горячий спай. К верхнему концу трубки, где горит газ, присоединяется вторая ветвь термопары из сплава цинка с сурьмой. ТЭЭЛ соединены широкими медными пластинками, которые одновременно служат ребрами охлаждения. Полезная мощность этого ТЭГ составляла 6 *вт*.

Другая модель ТЭГ (динафор Хейля), применявшаяся в Германии, показана на рис. 1.5. Такие ТЭГ выпускались мощностью от 1 до 15 *вт* [5].

Небезынтересно заметить, что в тот период по данным А. А. Эйхенвальда при стоимости 1 л газа 0,1 коп. 1 *квт·ч* электроэнергии,

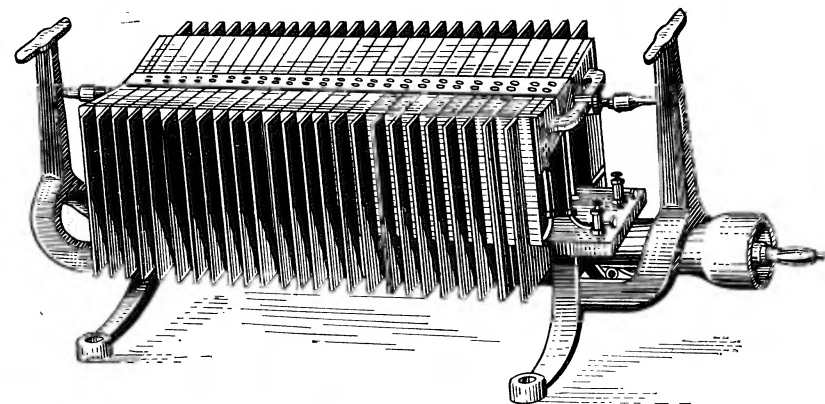


Рис. 1.4. Термобатарея Гюльхера.

полученный с помощью таких ТЭГ, стоил 3 руб., а стоимость электроэнергии в то время в Москве составляла 20 коп./*квт·ч* [9], т. е. широкое использование термоэлектрических генераторов было экономически нецелесообразно.

В конце двадцатых годов академик А. Ф. Иоффе с сотрудниками приступил к обстоятельному изучению полупроводников в лабораториях Ленинградского физико-технического института АН СССР. В результате был определен механизм электропроводности полупроводников, исследованы термоэлектрические свойства, гальвано-магнитные явления и другие вопросы полупроводниковой электроники [16, 17]. Результаты этих исследований показали на возможность создания термоэлектрических генераторов с к. п. д. в 2,5—4%, а в дальнейшем, по мере разработки полупроводниковых термоэлементов, была показана возможность получения к. п. д. до 10—15% [6, 18, 19].

В этот период возрос интерес к автономным источникам электроэнергии в связи со значительным расширением радиосети и использованием радиоприемников в районах, удаленных от электростанций. В частности, в 1928 г. в отечественной печати появилось сообщение П. О. Чечик о работе ТЭГ на железо-никелевых ТЭЭЛ, источником тепла для которого служила керосиновая осветительная лампа.

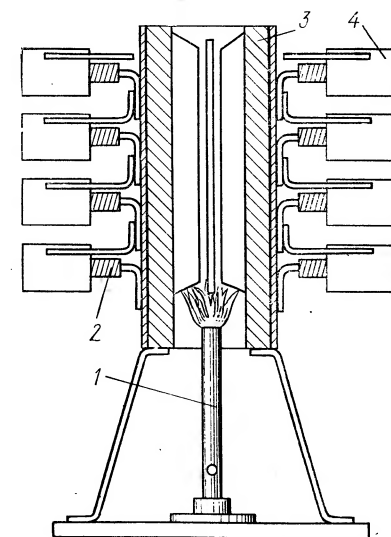


Рис. 1.5. Динафор (ТЭГ) Хейля:
1 — газовая горелка; 2 — ТЭЭЛ из ZnSb и константана; 3 — горячий цилиндр; 4 — охлаждающие ребра.

В 1937 г. А. Г. Ивахненко описал конструкцию ТЭГ с осветительной лампой с ТЭЭЛ из железо-константана или медь-константана для питания цепей накала радиоприемника [5]. Эти ТЭГ с металлическими ТЭЭЛ имели низкий к. п. д. (намного меньше 1%).

В 1940—1941 гг. в Ленинградском физико-техническом институте АН СССР был создан первый в мире тип полупроводникового ТЭГ. В 1940 г. Ю. П. Маслаковец сообщил о ТЭЭЛ из сернистого свинца с к. п. д. порядка 3% [19], т. е. приблизительно в десять раз большим, чем к. п. д. ТЭЭЛ с металлическими элементами.

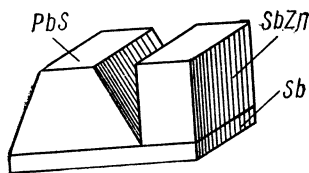


Рис. 1.6. Полупроводниковый термоэлемент.

В то же время был создан и фотоэлемент на основе сернистого свинца с к. п. д. до 3,7%.

В 1943—1945 гг. под руководством А. Ф. Иоффе был разработан и пущен в серию первый полупроводниковый генератор ТГ-1. Генератор, приспособленный для работы в полевых условиях, изготавливался в виде котелка, который для нагрева горячих спаев ставился на костер, а холодные спаи

охлаждались кипящей водой. Генератор использовался как источник питания армейской радиостанции «Север».

В середине 40-х годов в СССР велись работы и по созданию ТЭГ для питания радиоприемников в районах, удаленных от источников электроэнергии. В первых моделях таких ТЭГ ТЭЭЛ изготавливались из сернистого свинца (отрицательная ветвь) и интерметаллического соединения сурьмы и цинка (положительная ветвь). Ветви этого ТЭЭЛ соединялись электродом из сурьмы, как это показано на рис. 1.6. Их к. п. д. достигал 3,5% [6].

В Армии США во время второй мировой войны также использовались ТЭГ мощностью 5 *вт* (для питания радиоаппаратуры), работавшие на бензине. Однако они были с ТЭЭЛ из металлических сплавов с низким к. п. д. — порядка 0,2%.

Теллес (США) изучила и использовала несколько сплавов на основе цинка, сурьмы, висмута, и в частности ZnSb (Sn, Ag, Bi) в паре с 91% Bi + 9% Sb (вес. %), и получила ТЭГ с к. п. д. до 3,3% и более (при перепаде температур 400° С).

В 1953 г. промышленность СССР приступила к серийному выпуску термоэлектродвигателя ТГК-3 мощностью 3 *вт*. На подмосковном заводе «Термоэлектродвигатель» было организовано крупносерийное производство усовершенствованных ТЭГ — для питания радиоприемников в неэлектрифицированных районах. Усовершенствованный серийный ТЭГ типа ТГК-2-2 на полупроводниках мощностью несколько ватт получал тепло от круглофитильной керосиновой лампы и использовался для питания радиоприемника «Минск» и др. Срок службы генератора несколько тысяч часов.

В 1956—1957 гг. вышли фундаментальные труды академика А. Ф. Иоффе и его учеников по теории и результатам экспериментальных работ в области полупроводников и полупроводниковых устройств, термоэлектрических явлений и термоэлектрических генераторов [19].

Б. Т. Коломийцем, Б. А. Остроумовым и др. [7] были созданы слоистые ТЭЭЛ с неодинаковым составом ветвей из халькогенидов висмута, сурьмы, свинца и германия, и в интервале температур 50—700° С был получен к. п. д. 13,5%, что приблизительно в три раза выше, чем при использовании однородных ветвей.

Возможность использования ЯР для производства электроэнергии вызвало расширение работ в области прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, особенно эффективно начал развиваться термоэлектрический способ преобразования.

В 1959—1964 гг. были разработаны и испытаны ТЭГ на полонии-210 мощностью 5 *вт*, ТЭГ «Бета-1» на цери-144, ТЭГ «Бета-2» на стронции-90 и др. [20, 21]. Этот период можно считать началом использования в СССР радиоизотопных термоэлектрических генераторов различного назначения.

В США изотопный ТЭГ на полонии-210 мощностью 2,4 *вт* впервые продемонстрирован в 1959 г. [22]. С того времени в США ведется разработка и создание различных радиоизотопных ТЭГ. В последние годы начали разработку подобных генераторов и другие страны.

СССР на третьей Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964 г.) сделано сообщение о пуске первого в мире ядерного реактора на быстрых нейтронах с прямым получением электроэнергии при помощи полупроводниковых термоэлементов (установка «Ромашка» электрической мощностью 0,5 *квт*). Установка была пущена в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова 14 августа 1964 г. и непрерывно проработала в течение 15 тыс. ч.

В США подобная термоэлектрическая установка СНАП-10А, мощностью также 0,5 *квт*, с реактором на тепловых нейтронах и жидкометаллическим теплоносителем была запущена в космос 3 апреля 1965 г. и проработала 43 дня [7].

В эти же годы Энергетическим институтом им. Г. М. Кржижановского и Физико-техническим институтом АН Туркменской ССР создана опытная солнечная водоподъемная установка для пустынь СВ-1 с ТЭГ мощностью 0,3 *квт*. Установка имеет параболический концентратор солнечной энергии и полупроводниковые термоэлементы [23—25].

В последнее время американской фирмой «Мартин» начаты разработки термоэлектрических энергетических установок с ядерными реакторами мощностью от 30 до 1300 *квт* [26].

Таким образом, в шестидесятые годы началось использование атомной энергии в установках с термоэлектрическими преобразователями. Начался новый этап в развитии термоэлектрической энергетики [27].

ГЛАВА 2

РАСЧЕТЫ

ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ

§ 2.1

Основные термоэлектрические явления

К термоэлектрическим явлениям относится группа физических явлений, обусловленных существованием взаимосвязи между тепловыми и электрическими процессами в проводниках электричества.

В замкнутой цепи, состоящей из разнородных материалов, возникает термоэлектродвижущая сила (ТЭДС), если места контактов (спаев) поддерживать при различных температурах (эффект Зеебека).

В простейшем случае, когда электрическая цепь состоит из двух различных проводников, последнюю называют *термоэлементом*, или *термопарой* (рис. 2.1). ТЭДС (E) зависит только от температур горячего (T_r) и холодного (T_x) спаев и природы материалов, составляющих термоэлемент. Для небольшого интервала температур ТЭДС можно с достаточной для практических целей точностью считать пропорциональной разности температур и некоторому коэффициенту α , называемому *коэффициентом ТЭДС* [1]:

$$E = \alpha (T_r - T_x).$$

Рис. 2.1. Схема термоэлектрического элемента.

Коэффициент ТЭДС имеет размерность [в/град] и зависит от свойств материалов ветвей термоэлемента и интервала рабочих температур, в некоторых случаях он меняет знак с изменением температуры [2].

Качественно явление Зеебека можно объяснить следующим образом. В различных проводниках энергия свободных электронов, участвующих в электрическом токе, различна и по-разному изменяется с изменением температуры. При наличии градиента температуры вдоль проводника электроны на горячем конце приобретают более высокие скорости и в результате появляется поток электронов от горячего конца к холодному; на холодном конце накапливается отрицательный заряд, а на горячем остается нескомпенсированный положительный заряд. Накопление продолжается до тех пор, пока возникшее падение потенциала не создаст встречный поток электро-

нов, равный первичному потоку, вызванному различием тепловых скоростей. Разность таких падений потенциалов в двух проводниках, образующих термоэлемент, и обуславливает возникновение ТЭДС [3].

Параллельно с возникновением электрического тока при наличии разности температур в цепи разнородных проводников наблюдается обратное явление (*эффект Пельтье*): нагревание или охлаждение спаев разнородных проводников при прохождении через них электрического тока. При этом выделение или поглощение тепла зависит от направления тока. На рис. 2.2 показана схема цепи Пельтье, содержащая два различных материала A и B (например, сурьму и висмут.) При пропускании электрического тока через эту

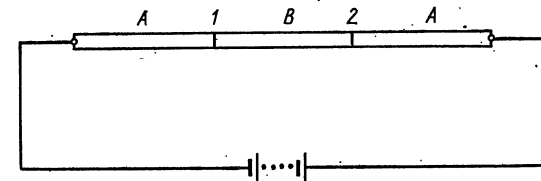


Рис. 2.2. Схема цепи для демонстрации эффекта Пельтье:
A — сурьма; B — висмут.

цепь спай 1 нагревается, а спай 2 охлаждается. При изменении направления тока охлаждаться будет спай 1, а нагреваться — спай 2. Эти изменения температуры можно измерить с помощью термопары [4, 5].

Количество тепла Пельтье Q_π пропорционально силе тока I и коэффициенту Пельтье π , зависящему от свойств материалов, находящихся в контакте:

$$Q_\pi = \pi I.$$

Коэффициент Пельтье π имеет размерность [в] и его произведение на ток в цепи определяет тепловую мощность, выделяемую или поглощаемую в местах контактов. Согласно теории, подтвержденной экспериментальными данными, между коэффициентом Пельтье и ТЭДС существует следующая связь [6]:

$$\pi = \alpha T.$$

Количество тепла Пельтье может быть так же определено по формуле

$$Q_\pi = \alpha I T.$$

Явление Пельтье можно рассматривать как перенос тепла электрическим током от одного спаев разнородных проводников к другому, который как бы увеличивает теплопроводность этих проводников

[7]. Явление Пельтье используется для получения низких температур, например в холодильных машинах.

Подобное явление наблюдается в однородных неравномерно нагретых проводниках (*эффект Томсона*). Если вдоль проводника, по которому течет ток, существует перепад температур, то в дополнение к теплу Джоуля в объеме проводника выделяется (или поглощается, в зависимости от направления тока) некоторое количество тепла Q_τ , пропорциональное силе тока, перепаду температур и коэффициенту Томсона τ , зависящему от природы проводника:

$$Q_\tau = \tau (T_1 - T_2)I,$$

где τ — коэффициент Томсона [в/град], зависит от температуры и материала и может быть как положительным, так и отрицательным. По теории Томсона коэффициент ТЭДС связан с τ соотношением [8, 9]

$$d\alpha/dT = (\tau_1 - \tau_2)/T,$$

которое неоднократно подтверждено экспериментально. При $\tau_1 = \tau_2$, т. е. в однородном проводнике при наличии градиента температур, эффект Зеебека отсутствует.

Физический смысл явления Томсона заключается в следующем. Если в проводнике с током существует градиент температур и направление тока соответствует движению электронов от горячей конца к холодному, то, переходя из более горячей области в более холодную, электроны передают избыточную энергию окружающим атомам, чем вызывают нагрев проводника (выделение тепла). При обратном направлении тока электроны, переходя из более холодной области в более горячую, отбирают энергию от окружающих атомов (поглощение тепла). Для более точного описания явления необходимо учесть тот факт, что в первом случае электроны тормозятся, а во втором — ускоряются полем ТЭДС. Это изменяет значение коэффициента Томсона, а в некоторых случаях приводит к перемене его знака.

В качестве примера рассмотрим простейший замкнутый термоэлемент (рис. 2.3, а), состоящий из двух различных материалов A_1 и A_2 , при температуре спаев T_r и T_x . Принципиальная картина изменения ТЭДС в этом термоэлементе показана на рис. 2.4. ТЭДС в цепи равна сумме составляющих и характеризуется величиной $E = IR$, где R — электрическое сопротивление цепи [10]. На практике часто бывает необходимо вводить в цепь участки из третьего материала A_3 (например, в термогенераторах или термопарах). Такая цепь из трех материалов показана на рис. 2.3, б. Включение в цепь любого материала не влияет на величину ТЭДС, если температуры концов этого материала одинаковы [11].

На рис. 2.3, в показана схема термоэлемента с промежуточным нейтральным проводником, используемая для измерения температу-

ры. Одна из ветвей A_2 разъединена для подсоединения нейтрального провода A_3 измерительного прибора. Проводники A_4 и A_5 служат для подвода и отвода тепла. Эти проводники имеют одинаковую температуру и не изменяют термо-э. д. с. в цепи такого термоэле-

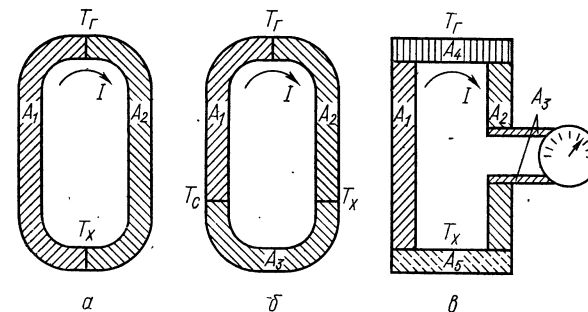


Рис. 2.3. ТЭЭЛ из нескольких проводников:
а — два ТЭМ: A_1 и A_2 ; б — два ТЭМ и один проводник A_3 ;
в — два ТЭМ и три проводника A_3 , A_4 , A_5 .

мента. Для определения ТЭДС любой пары проводников достаточно знать значение термо-э. д. с. этих проводников относительно третьего проводника, принятого в качестве эталона. При соблюдении правила использования третьего проводника (одинаковая темпера-

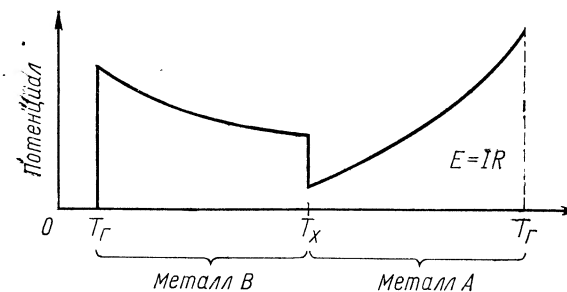


Рис. 2.4. Картина изменения ТЭДС в замкнутом ТЭЭЛ.

тура концов) можно термоэлементы соединить в батарею, при этом ТЭДС батареи будет равна сумме термо-э. д. с. элементов.

Более подробное описание термоэлектрических явлений можно найти в работах [12—24].

§ 2.2

Баланс мощности в ТЭЭЛ

Основная характеристика термоэлектрического цикла — баланс мощности в ТЭЭЛ, используемой для генерирования электрического тока. Простейшая батарея термоэлементов показана на рис. 2.5.

Тепло поступает к горячим концам элементов через коммутационные пластины 1 и отводится от холодных концов через пластину 2 при температурах T_r и T_x соответственно. Потери тепла в окружающее пространство с боковых поверхностей ТЭЭЛ малы и в первом приближении ими можно пренебречь. Количество тепла, расходуемого горячим спаем термоэлемента, Q_r складывается из следующих частей:

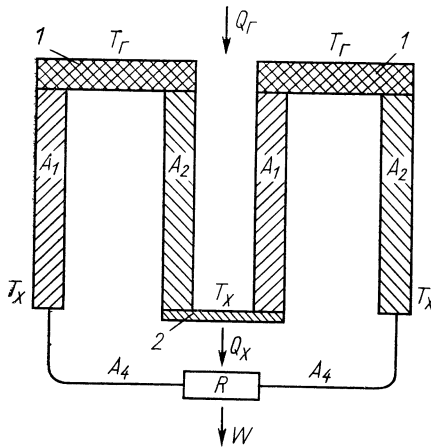


Рис. 2.5. Последовательное соединение двух ТЭЭЛ в простейшую батарею.

что вторая половина этого тепла отводится холодным спаем ТЭЭЛ).

Количество тепла, поступающего к горячим спаям, определится из выражения

$$Q_r = W + Q_K + (1/2) Q_\tau - (1/2) Q_D = \\ = \pi_{1,2}(T_r) I + K(T_r - T_x) + (1/2) I \int_{T_x}^{T_r} (\tau_2 - \tau_1) dT - (1/2) I^2 r.$$

Аналогично количество тепла, отводимого от холодных спаев ТЭЭЛ, равно

$$Q_x = \pi_{1,2}(T_x) I + K(T_r - T_x) + (1/2) I^2 r - (1/2) I \int_{T_x}^{T_r} (\tau_2 - \tau_1) dT.$$

Очевидно, что баланс расхода мощности для рассматриваемого ТЭЭЛ определится как $Q_r - Q_x - W = 0$, где W — полезная электрическая мощность, которая может быть определена из по-

следнего соотношения: $W = Q_r - Q_x$. Подставив сюда значения Q_r и Q_x , получим

$$W = I \left[\pi_{1,2}(T_r) - \pi_{1,2}(T_x) + \int_{T_x}^{T_r} (\tau_2 - \tau_1) dT - I r \right].$$

Из энергетического баланса обратимых процессов

$$E_{1,2}(T_r, T_x) = \pi_{1,2}(T_r) - \pi_{1,2}(T_x) + \int_{T_x}^{T_r} [\tau_2(T) - \tau_1(T)] dT.$$

Внося это значение в предыдущее уравнение, имеем $W = I(E - I r) = I E_n$, где E_n — разность потенциалов на нагрузке.

Обычно используются более простые формулы для определения характеристик ТЭЭЛ, например, когда разность $T_r - T_x$ меньше, чем средняя температура термоэлектрического цикла $(1/2)(T_r + T_x)$.

Поскольку теплообмен с источником тепла и холода происходит на концах ТЭЭЛ, можно рассматривать вместе тепло Пельтье и Томсона [2]. Пусть $Q_{\pi, r} = Q_{\pi, r} + (Q_\tau/2)$ и $Q_{\pi, x} = Q_{\pi, x} + (Q_\tau/2)$. Из предыдущего

$$\frac{Q_\tau}{I} = - \int_{T_x}^{T_r} \frac{d\alpha_{1,2}}{dT} dT = - T \alpha_{1,2} \Big|_{T_x}^{T_r} + \int_{T_x}^{T_r} \alpha_{1,2} dT = \\ = T_x \alpha_{1,2}(T_x) - T_r \alpha_{1,2}(T_r) + (T_r - T_x) \alpha_{cp},$$

где $\alpha_{cp} = \frac{1}{T_r - T_x} \int_{T_x}^{T_r} \alpha_{1,2}(T) dT$. Внося эти значения Q_τ в выражение для $Q_{\pi, r}$, получаем

$$Q_{\pi, r}/I = (1/2) [T_r \alpha_{1,2}(T_r) + T_x \alpha_{1,2}(T_x) + \\ + (T_r - T_x) \alpha_{cp}] = T_r \alpha_{cp} + (\Delta/2)$$

и аналогичным образом

$$Q_{\pi, x}/I = T_x \alpha_{cp} + (\Delta/2),$$

где

$$\Delta = T_r [\alpha_{1,2}(T_r) - \alpha_{cp}] + T_x [\alpha_{1,2}(T_x) - \alpha_{cp}].$$

Вычитая почленно, получаем $Q_{\pi, r} - Q_{\pi, x} = (T_r - T_x) \alpha_{cp} I$. Величина Δ характеризует необратимый эффект передачи тепла Томсона к двум концам ТЭЭЛ (если $\Delta = 0$, то $Q_{\pi, r}/Q_{\pi, x} = T_r/T_x$, что является признаком обратимости). Это не совсем точно, так как выше было предположено, что к обоим концам ТЭЭЛ передается одинаковое количество тепла Томсона. В действительности доля тепла Томсона, передаваемого каждому концу ТЭЭЛ, зависит от

распределения этого тепла вдоль ветвей термоэлемента. Ниже рассмотрены условия, при которых эта неточность мала.

Пусть $T_{cp} = (1/2)(T_r + T_x)$. Функцию $\alpha_{1,2}(T)$ можно выразить в виде ряда по степеням $(T - T_{cp})$:

$$\alpha_{1,2}(T) = a_0 + a_1(T - T_{cp}) + a_2(T - T_{cp})^2 + \dots$$

Подставив этот результат в указанное выше определение α_{cp} , имеем

$$\alpha_{cp} = \frac{1}{T_r - T_x} \int_{T_x}^{T_r} \alpha_{1,2}(T) dT,$$

и, интегрируя это выражение, получаем

$$\alpha_{cp} = a_0 + (a_2/3)(T_r - T_{cp})^2 + \dots$$

Подставляя этот результат в определение Δ , находим

$$\Delta = (a_1/2)(T_r - T_x)^2 + (a_2/6)(T_r + T_x)(T_r - T_x)^2 + \dots$$

Отсюда следует, что величина Δ порядка $(T_r - T_x)^2$. Если $(T_r - T_x)$ мало, то величиной $\Delta/2$ можно пренебречь по сравнению с Q_{π} и Q_{τ} . Тогда получаем

$$Q_{\pi r} \cong T_r \alpha_{cp} I; \quad Q_{\pi x} \cong T_x \alpha_{cp} I.$$

Таким образом, при малой величине $(T_r - T_x)$ относительно T_{cp} суммарный эффект Пельтье и Томсона приблизительно эквивалентен одному эффекту Пельтье с постоянным усредненным коэффициентом Зеебека. На практике обнаружено, что эта эквивалентность существует при значениях $(T_r - T_x) \leq T_{cp}$.

Эти приближенные способы учета тепла Пельтье и Томсона дают возможность упростить расчет баланса энергии в термоэлементе. В этом случае подводимое к горячему спаю тепло определится из выражения

$$Q_r = T_r \alpha_{cp} I + K(T_r - T_x) - (I^2 r/2),$$

где $T_r \alpha_{cp} I$ — тепло Пельтье и Томсона; $K(T_r - T_x)$ — тепло, отводимое теплопроводностью; $(I^2 r/2)$ — половина тепла Джоуля, выделяющегося в ТЭЭЛ. Тепло, отводимое от холодного спаю,

$$Q_x = T_x \alpha_{cp} I + K(T_r - T_x) + (1/2) I^2 r.$$

Электрическая мощность на полезной нагрузке

$$W = Q_r - Q_x = [(T_r - T_x) \alpha_{cp} - Ir] I = E_{\pi} I,$$

где $E_{\pi} = (T_r - T_x) \alpha_{cp} - Ir$ — выходное напряжение на нагрузке. Как видно из этого выражения, электрическая мощность ТЭЭЛ

при заданных T_r, T_x, α_{cp}, r зависит от электрического сопротивления полезной нагрузки R . Полагаем, что $R/r = m$. Тогда

$$W = E_{\pi} I = \frac{E^2 R}{(R+r)^2} = \frac{E^2}{r} \cdot \frac{1}{\left(m + 2 + \frac{1}{m}\right)}.$$

Видим, что максимальная мощность ТЭЭЛ имеет место при минимуме величины $f(m) = m + 2 + (1/m)$ (что соответствует $m = 1$), т. е. $R = r$.

Таким образом, максимальная мощность ТЭЭЛ, отдаваемая полезной нагрузке, может достигать $W = E^2/(4r)$, где E — напряжение между концами разомкнутого ТЭЭЛ и r — электрическое сопротивление самого ТЭЭЛ.

Представим себе общую картину изменения полезной электрической мощности ТЭЭЛ в зависимости от сопротивления R полезной нагрузки. На рис. 2.6 показана эта зависимость (для $E = 1$ и $r = 1$). Видно, что небольшие отклонения величины m от единицы (приблизительно от 0,7 до 2) мало влияют на значение выходной мощности.

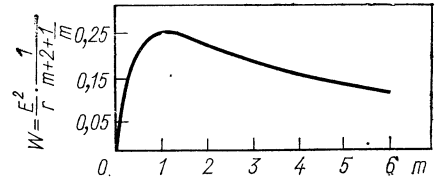


Рис. 2.6. Зависимость коэффициента полезной мощности ТЭЭЛ от $R/r = m$.

К. п. д. простейшего ТЭЭЛ при максимальной мощности ($r = R$) можно определить исходя из приведенных выше соотношений, без учета влияния температуры на характеристики материала, пренебрегая потерями в окружающую среду, контактными сопротивлениями и т. д. Тепловой к. п. д. η_T такого ТЭЭЛ в общем виде может быть определен как

$$\eta_T = W/Q_r = (E^2/4r) / [T_r \alpha_{1,2} I + K(T_r - T_x) - (1/2) I^2 r].$$

Имея в виду, что

$$E = \alpha_{1,2}(T_r - T_x) \text{ и } I = (E/2r) = \alpha_{1,2}(T_r - T_x)(1/2r),$$

а также полагая $(T_r - T_x)/T_r = \eta_K$ (к. п. д. цикла Карно) и $Z = \alpha_{1,2}^2/(rK)$ (добротность), получаем после преобразований

$$\eta_T = \frac{W}{Q_r} = \frac{T_r - T_x}{T_r} \times \frac{1}{2 + \frac{4}{T_r \alpha_{1,2}^2/(rK)} - \frac{1}{2} \cdot \frac{T_r - T_x}{T_r}} = \eta_K \frac{1}{2 + \frac{4}{T_r Z} - \frac{1}{2} \eta_K}.$$

Добротность одного ТЭМ можно определить по условному ТЭЭЛ, ветви которого геометрически одинаковы или подобны [т. е. отношение $l/s = \text{const}$], а абсолютные значения α, ρ и κ одинаковы в обеих ветвях и соответствуют рассматриваемому материалу, но вели-

чина α имеет разные знаки. Для этого условного ТЭЭЛ $\alpha_1 = -\alpha_2$, $K = 2\kappa (l/s)$, $r = 2\rho (l/s)$. Тогда для рассматриваемого материала добротность $Z = \alpha_1^2 / (\kappa_1 \rho_1)$, где α_1 , ρ_1 , κ_1 — характеристики рассматриваемого ТЭМ.

Как видно из определения к. п. д. ТЭЭЛ при максимальной мощности, последний не зависит от геометрических размеров ветвей и кроме температур определяется величиной Z — добротностью материала. Например, при $T_r = 1273^\circ \text{K}$, $T_x = 300^\circ \text{K}$, $Z = 2 \cdot 10^{-3} (\text{град})^{-1}$ получаем $\eta_k = (1273 - 300)/1273 = 0,76$ и к. п. д. ТЭЭЛ может достигать 0,24 (при $R = r$).

Как видно из приведенного выше выражения для η_r , произведение температуры горячего спая на добротность материала $T_r Z$ определяет к. п. д. В технической литературе для оценки материалов применяется другой безразмерный параметр применительно к режиму максимального к. п. д.:

$$\theta = T_{cp} Z, \text{ где } T_{cp} = (1/2) (T_r + T_x).$$

Обычно материалы ветвей термоэлементов неодинаковы. В таком случае определяют наиболее выгодное соотношение размеров ветвей термоэлементов, исходя из минимума произведения общего коэффициента теплопроводности ветвей на общее электрическое сопротивление ТЭЭЛ, чем и достигается наибольшее значение Z . Указанное произведение в общем случае имеет вид

$$Kr = [(\kappa_1 s_1 / l_1) + (\kappa_2 s_2 / l_2)] \times [(\rho_1 l_1 / s_1) + (\rho_2 l_2 / s_2)].$$

Чаще всего длины ветвей ТЭЭЛ выбираются одинаковыми, т. е. $l_1 = l_2$. Тогда достаточно выбрать отношение сечений ветвей s_1/s_2 , при котором функция Kr имеет минимальное значение, соответствующее максимальной величине к. п. д. В связи с этим вводят в определение Kr величину s_1/s_2

$$Kr = (\kappa_1 s_1 + \kappa_2 s_2) \left(\frac{\rho_1}{s_1} + \frac{\rho_2}{s_2} \right) = \kappa_1 \rho_1 + \kappa_2 \rho_2 + \kappa_2 \rho_1 \frac{s_2}{s_1} + \kappa_1 \rho_2 \frac{s_1}{s_2}.$$

Дифференцируя по s_1/s_2 и приравнявая производную нулю, получаем

$$s_1/s_2 = \sqrt{(\rho_1/\kappa_1)/(\rho_2/\kappa_2)} \text{ и } Kr = (\sqrt{\kappa_1 \rho_1} + \sqrt{\kappa_2 \rho_2})^2.$$

Физический смысл этого выражения состоит в том, что сечение должно быть несколько больше у того материала, электрическое сопротивление которого больше. Таким же образом сечение должно быть меньше у того материала, коэффициент теплопроводности которого больше. Если отношение ρ/κ одинаково у материалов обеих ветвей, сечения ветвей, очевидно, одинаковы. По закону Видемана — Франца для большинства металлов отношение коэффициентов теплопроводности и электропроводности при постоянной тем-

пературе есть величина постоянная, т. е. у таких металлов разница сечений ветвей термоэлементов небольшая. Так, отношение сечений ветвей ТЭЭЛ из железа и меди около 1,1 [25]. В полупроводниковых термоэлементах это отношение может достигать большей величины. Например, в термоэлектрическом генераторе из теллурида свинца с различными добавками при одинаковой длине ветвей 2,5 см отношение сечений равно 1,4 (диаметры ветвей n -типа — 0,59 см, p -типа — 0,7 см).

В табл. 2.1 приведен тепловой баланс ТЭЭЛ, вычисленный по изложенной выше методике для теллуристого свинца, сурьмы и

Таблица 2.1
Баланс мощности в условном ТЭЭЛ

Характеристика	Материал ветви		
	Теллурид свинца	Сурьма	Копель
Температура горячего спая, $^\circ\text{C}$	500	500	800
Температура холодного спая, $^\circ\text{C}$	50	50	50
Разность температур $\Delta T = T_r - T_x$, $^\circ\text{C}$	450	450	750
Средние характеристики материала:			
α , мкВ/град	240	50	50
коэффициент теплопроводности κ , $\text{Вт/(см}\cdot\text{град)}$	0,017	0,17	0,40
удельное электросопротивление ρ , $\text{ом}\cdot\text{см}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$0,05 \cdot 10^{-3}$
Сопротивление ТЭЭЛ $r = 2\rho_1 = R$, ом	$6,6 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$
Теплоемкость ТЭЭЛ $K = 2\kappa (l/s)$, Вт/град	0,034	0,34	0,8
ТЭДС без нагрузки $E = 2\alpha_1 (T_r - T_x)$, В	0,216	0,045	0,075
Рабочее напряжение $E_n = (1/2) E$, В	0,108	0,0225	0,0375
Рабочий ток $I = E/(2r)$, А	16,4	112,5	375
Полезная мощность $W = (E/2)^2 (1/R)$, Вт	1,775	2,52	14,1
Тепло, уносимое от горячего спая:			
тепло Пельтье и Томсона $Q_{\pi, x} = T_x \alpha_{1,2}$, Вт	6,08	8,7	40,3
теплопроводностью $Q_K = K (T_r - T_x)$, Вт	15,30	153	600
тепло Джоуля (возврат тепла) $(1/2) Q_d = (1/2) I^2 r$, Вт	0,887	1,26	7,05
всего $Q_r = Q_{\pi, r} + Q_K - (1/2) Q_d$, Вт	20,49	160,4	633
Тепловой к. п. д. ТЭЭЛ $\eta_r = (W/Q_r) 100$, %	8,65	1,57	2,12
Тепло, отводимое холодным спаем:			
тепло Пельтье и Томсона $Q_{\pi, x} = -T_x \alpha_{1,2} I$, Вт	2,54	3,64	12,1
всего $Q_x = Q_{\pi, x} + Q_K + \frac{1}{2} I^2 r$, Вт	18,73	157,9	619,15
Характеристика короткого замыкания:			
сила тока $I_{к.з} = E/r$, А	32,8	225	750
электрическая мощность $Q_3 = I_{к.з}^2 r$, Вт	7,1	10,1	56,2
тепло Пельтье и Томсона $Q_{\pi, r} = T_r \alpha_{1,2} I_{к.з}$, Вт	12,16	17,4	80,6
все подводимое тепло $Q_r = Q_{\pi, r} + Q_K - (1/2) Q_3$, Вт	23,91	165,4	652

копеля. Расчет выполнен в предположении, что материалы ветвей ТЭЭЛ имеют одинаковые абсолютные значения α , ρ , κ и ТЭДС разных знаков. Принято также, что обе ветви ТЭЭЛ имеют одинаковые геометрические размеры — длину 1 см и сечение 1 см², тепловые потери в местах контактов через коммутацию и т. д. не учитываются. Вычисленный таким образом тепловой баланс дает представление

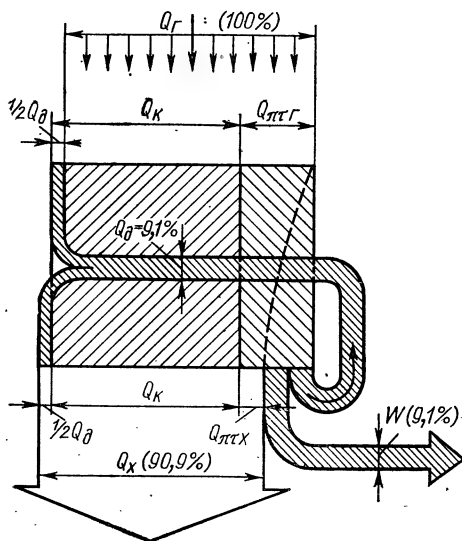


Рис. 2.7. Энергетический баланс ТЭЭЛ из теллуристого свинца.

об особенностях термоэлектрических материалов и характеристиках ТЭЭЛ. Из таблицы видно, что специальные полупроводниковые материалы, в данном случае теллурид свинца, имеют значительно больший к. п. д. преобразования тепла в электричество, чем легированные полупроводники и металлические сплавы.

На рис. 2.7 дана графическая интерпретация энергетического баланса ТЭЭЛ из теллуристого свинца (режим максимальной мощности, к. п. д. без учета потерь), построенная по данным теплового баланса табл. 2.1. На диаграмме принят одинаковый масштаб по ширине энергетических потоков. Тепло, подводимое к горячему спаю, переносится к холодному спаю теплопроводностью Q_k и теплом Пельтье — Томсона $Q_{пт}$. Разница в величине тепла Пельтье — Томсона горячего и холодного спаев равна общему количеству полученной электроэнергии, половина которой отдается полезной нагрузке.

§ 2.3

Оптимизация к. п. д. простейшего ТЭЭЛ

При оптимизации характеристик ТЭЭЛ важное значение имеют условия получения большего к. п. д. Выше принималось, что наибольшая мощность ТЭЭЛ достигается при равенстве внутреннего сопротивления элемента и полезной нагрузки, т. е. когда $R = r$ или $R/r = m = 1$. Условие получения максимального к. п. д. ТЭЭЛ в зависимости от величины внешней нагрузки может быть найдено в предположении $(\partial \eta_r / \partial m) = 0$ [3]. Величину к. п. д. η_r можно выразить через $R/r = m$:

$$\begin{aligned} \eta_r &= \frac{W}{Q_r} = \frac{E_{\pi} I}{T_r \alpha_{1,2} I + K(T_r - T_x) - \frac{1}{2} I^2 r} = \\ &= \eta_K \frac{rm/(r+rm)}{1 + \left(\frac{K(r+rm)}{\alpha_{1,2}^2 T_r} \right) + \frac{1}{2} \eta_K \frac{r}{(r+rm)}} = \\ &= \eta_K \frac{1}{\frac{m+1}{m} + \frac{(1+m)^2}{m} \cdot \frac{1}{ZT_r} - \frac{\eta_K}{2m}} = \eta_K \frac{1}{f(m)}. \end{aligned}$$

Функция $f(m)$ после преобразований имеет вид

$$f(m) = 1 + \frac{2}{T_r Z} + \frac{m}{T_r Z} = \frac{1}{m} \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{T_r + T_x}{T_r} + \frac{1}{T_r Z} \right).$$

К. п. д. имеет наибольшее значение при минимуме $f(m)$. Отсюда определяем оптимальное значение m :

$$M = R/r = \sqrt{1 + \frac{1}{2} (T_r + T_x) Z},$$

где M — отношение сопротивления полезной нагрузки к собственному сопротивлению ТЭЭЛ, при котором достигается наибольшая величина к. п. д. Иначе говоря, величина M определяет отношение полезного выходного напряжения ТЭЭЛ к напряжению, теряемому внутри ТЭЭЛ. Как видно из определения отношения M , оно зависит только от добротности Z и средней температуры $(T_r + T_x)/2$ и тем больше, чем выше средняя температура и добротность [2].

Введя отношение M в определение к. п. д. ТЭЭЛ, получим

$$\eta_r = \eta_K (M - 1) / [M + (T_x/T_r)].$$

В режиме максимального к. п. д. (в отличие от к. п. д. максимальной мощности) при больших значениях Z и T значение M может быть большим и тогда к. п. д. термоэлектрического цикла приближается к к. п. д. цикла Карно. С физической точки зрения это означает, что увеличивается доля электроэнергии, отдаваемая полезной нагрузке, и уменьшается количество тепла Джоуля, выделяющегося в ветвях ТЭЭЛ.

Если для какого-либо ТЭЭЛ добротность $2 \cdot 10^{-3} (\text{град})^{-1}$, $T_r = 1473^\circ \text{K}$, $T_x = 300^\circ \text{K}$, то $M = 1,665$ и к. п. д. (без учета потерь) равен 28,3%. В режиме максимальной мощности при тех же условиях к. п. д. равен 26,8%.

Таблица значений η_r в зависимости от T_r и Z , а также соответствующие диаграммы опубликованы в работе [3].

На рис. 2.8 показаны значения к. п. д. термоэлементов при различных Z и разности температур $T_r - T_x$ [26]. Диаграмма построена при $T_x = 27^\circ \text{C}$ для случая системы максимального к. п. д.

(сплошные линии) и системы с максимальной мощностью (пунктирные линии). Диаграмма показывает, что к. п. д. ТЭЭЛ в обоих случаях приблизительно одинаковы, если Z и $T_r - T_x$ невелики.

Для случая, когда Z не зависит от температуры, при наибольшем к. п. д. мощность $W_{\text{опт}} = E^2 M / [r(M+1)^2]$, а для случая максимальной мощности $W_{\text{макс}} = E^2 / 4r$, где $M = \sqrt{1 + ZT_{\text{ср}}}$, r — внутреннее сопротивление ТЭЭЛ.

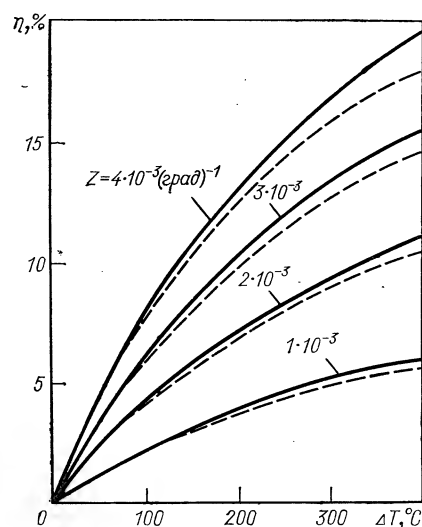


Рис. 2.8. Зависимость к.п.д. ТЭЭЛ от разности температур спаев ΔT и добротности Z для режимов максимального к.п.д. (сплошные кривые) и максимальной мощности (пунктирные кривые).

При этом использовались оптимальные отношения сечений ветвей ТЭЭЛ и оптимальная внешняя нагрузка, определенные вышеуказанным способом применительно к получению максимального к. п. д. Рассчитывался термоэлемент простейшего типа, состоящий из двух однородных ветвей n - и p -типа длиной по 1 см, соединенных последовательно

Отсюда $W_{\text{макс}}/W_{\text{опт}} = (M+1)^2/4M$.

Значения $W_{\text{макс}}/W_{\text{опт}}$ для частных случаев приведены в табл. 2.2.

В табл. 2.3 приведены экспериментальные результаты, полученные В. А. Кремневым [27] для ТЭГ, работающих в режиме максимального к. п. д., т. е. при $R = r\sqrt{1 + ZT_{\text{ср}}}$, и в режиме максимальной мощности, т. е. при $R = r$.

Переход от режима $\eta_{\text{макс}}$ к режиму $W_{\text{макс}}$ вызывает снижение $\Delta T = T_r - T_x$ и уменьшает к. п. д. до 4 %.

В табл. 2.4 приведены результаты упрощенных расчетов нескольких вариантов ТЭЭЛ (на основе теллуристого свинца, кремний-германиевого сплава и хромель-константана).

При этом использовались оптимальные отношения сечений ветвей ТЭЭЛ и оптимальная внешняя нагрузка, определенные вышеуказанным способом применительно к получению максимального к. п. д. Рассчитывался термоэлемент простейшего типа, состоящий из двух однородных ветвей n - и p -типа длиной по 1 см, соединенных последовательно

Таблица 2.2

Отношение максимальной мощности ТЭЭЛ к мощности при оптимальном к. п. д.

$Z, (^\circ\text{C})^{-1}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$		$1 \cdot 10^{-3}$		$2 \cdot 10^{-3}$	
$T_{\text{ср}}, ^\circ\text{K}$	700	1300	700	1300	700	1300
$ZT_{\text{ср}}$	0,35	0,65	0,7	1,3	1,4	2,6
M	1,16	1,28	1,30	1,52	1,55	1,9
$W_{\text{макс}}/W_{\text{опт}}$	1,005	1,012	1,023	1,045	1,08	1,105

Таблица 2.3

К. п. д. ТЭЭЛ при максимальной мощности и оптимальном к. п. д. [32]

$t_x, ^\circ\text{C}$	$R = r\sqrt{1 + ZT_{\text{ср}}}$			$R = r$			$\frac{\eta_{\text{тепл}} \cdot \eta_T}{\eta_{\text{тепл}} \cdot \eta_T}$
	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$\eta_{\text{тепл}}, \%$	$\eta_T, \%$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$\eta_{\text{тепл}}, \%$	$\eta_T, \%$	
30	195	78	5,0	191	78,9	4,91	0,998
30	245	85	5,4	238	85,4	5,28	0,985
50	175	70	4,7	170	70,1	4,50	0,967
50	230	86,5	5,86	224	86,8	5,61	0,961

Общая мощность ТЭГ 1 кВт, рабочее напряжение 120 в. Как и в предыдущем случае, при составлении теплового баланса ТЭЭЛ не учитывались потери тепла в контактах, на коммутацию от боковых поверхностей ТЭЭЛ и т. п. Указанные в таблице значения к. п. д. и удельной мощности на 1 см³ термоэлектрика являются наибольшими из возможных при длине столбика в 1 см. Несмотря на упрощенность этих расчетов, видно, что с помощью полупроводниковых ТЭЭЛ из однородных столбиков можно получить к. п. д. 5—10%, при разности температур горячего и холодного спаев 400—500° С. Дальнейшее повышение к. п. д. ТЭЭЛ может быть достигнуто увеличением разности температур, улучшением добротности термоэлектрических материалов и усовершенствованием конструкций ТЭЭЛ.

Таблица 2.4

Расчеты вариантов ТЭГ

Характеристика	Pb Te	Ge Si	Хромель-константан
Температура:			
горячего спаи $T_r, ^\circ\text{C}$	500	1000	800
холодного спаи $T_x, ^\circ\text{C}$	50	500	50
Перепад температуры на ТЭЭЛ ($T_r - T_x$), $^\circ\text{C}$	450	500	750
Материал p -типа (ветвь 1):			
средняя ТЭДС $\alpha_1, \text{в/град}$:	$220 \cdot 10^{-6}$	$220 \cdot 10^{-6}$	$32 \cdot 10^{-6}$
коэффициент теплопроводности $\kappa_1, \text{вт/(см} \cdot \text{град)}$	0,02	0,043	0,25
удельное электросопротивление $\rho_1, \text{ом} \cdot \text{см}$	0,002	0,002	$70 \cdot 10^{-6}$
добротность $Z_1 = \frac{\alpha_1^2}{\kappa_1 \rho_1}, (\text{град})^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$0,56 \cdot 10^{-3}$	$0,06 \cdot 10^{-3}$
Материал n -типа (ветвь 2):			
средняя ТЭДС $\alpha_2, \text{в/град}$	$-280 \cdot 10^{-6}$	$-320 \cdot 10^{-6}$	$-24 \cdot 10^{-6}$
коэффициент теплопроводности $\kappa_2, \text{вт/(см} \cdot \text{град)}$	0,02	0,042	0,45

Продолжение табл. 2.4

Характеристика	PbTe	GeSi	Хромель- константан
удельное электросопротивление ρ_2 , ом·см	0,005	0,003	$50 \cdot 10^{-6}$
добротность $Z_2 = \frac{\alpha_2^2}{\kappa_2 \rho_2}$, (град) $^{-1}$	$0,78 \cdot 10^{-3}$	$0,81 \cdot 10^{-3}$	$0,03 \cdot 10^{-3}$
$Kr = (\sqrt{\kappa_1 \rho_1} + \sqrt{\kappa_2 \rho_2})^2$	$0,27 \cdot 10^{-3}$	$0,42 \cdot 10^{-3}$	$0,08 \cdot 100^{-3}$
Среднее значение ТЭДС $\alpha_{1,2} = (\alpha_1 - \alpha_2)$, в/град	$500 \cdot 10^{-6}$	$540 \cdot 10^{-6}$	$56 \cdot 10^{-6}$
Добротность ТЭЭЛ $Z = \frac{\alpha_{1,2}^2}{K}$, (град) $^{-1}$	$0,9 \cdot 10^{-3}$	$0,7 \cdot 10^{-3}$	$0,04 \cdot 10^{-3}$
Средняя температура ТЭЭЛ (1/2) $(T_r + T_x)$, °C	550	1023	698
Отношение $M = R/r = \frac{\sqrt{1 + (1/2)(T_r + T_x)Z}}{1}$	1,23	1,30	1,015
Напряжение ТЭЭЛ $E_{\Pi} = \alpha_{1,2}(T_r - T_x)[M/(1 + M)]$, в	0,124	0,153	0,021
Количество ТЭЭЛ $n = 120 \text{ в} / E_{\Pi}$, шт.	970	785	5700
Ток в цепи при мощности 1 кВт и напряжении 120 в, а	8,33	8,33	8,33
Сопротивление одного ТЭЭЛ $r = E_{\Pi} / IM$, ом	0,0121	0,0142	0,0025
Отношение сечений ветвей	0,63	0,806	1,59
$\frac{s_1}{s_2} = \sqrt{\frac{\rho_1 \kappa_2}{\rho_2 \kappa_1}}$			
Сечение ветви 1 $s_1 = \frac{l}{r} [\rho_1 + \rho_2 (s_1/s_2)]$, см ²	0,43	0,312	0,060
То же 2 $s_2 = s_1 / \sqrt{\frac{\rho_1 \kappa_2}{\rho_2 \kappa_1}}$, см ²	0,68	0,39	0,038
К. п. д. Карно $\eta_K = \frac{T_r - T_x}{T_r}$	0,58	0,39	0,70
К. п. д. по материалу $\eta_z = (M - 1) / [M + (T_x/T_r)]$	0,14	0,157	0,0114
К. п. д. без учета потерь $\eta_T = \eta_K \eta_z \cdot 100\%$	8,15	6,16	0,8
Объем ТЭМ $nl(s_1 + s_2)$, см ³	1080	550	560

§ 2.4.

ТЭЭЛ с переменным составом ветвей

Повышение эффективности любой тепловой машины может быть достигнуто путем увеличения верхней температуры и снижения нижней температуры цикла. Предельные значения верхней температуры определяются свойствами конструктивных материалов, конструктивными особенностями и температурой источника тепла. Все это справедливо также и для машин, работающих на термоэлектрическом цикле. Однако термогенераторы могут работать в более широком диапазоне температур, чем паровые машины, поскольку у них отсутствуют вращающиеся части и дополнительные механические нагруз-

ки. Это обстоятельство значительно ослабляет зависимость прочности материалов от высокой температуры.

Специфическим фактором, определяющим к. п. д. ТЭЭЛ, является добротность материалов. Получение высокой добротности во всем диапазоне рабочих температур термоэлектрического цикла очень важно для повышения к. п. д.

Данные гл. 4 показывают, что реальные термоэлектрические материалы имеют максимальную добротность Z лишь в относительно узком диапазоне температур.

С этой целью ветви термоэлемента целесообразно изготавливать с переменным составом по длине или из нескольких однородных участков. Для низкотемпературного участка ветви концентрация примесей должна быть меньше, чем для высокотемпературного.

А. Т. Белевцев и др. [28] предложили проводить подбор примесей и концентраций носителей по предельной растворимости примесей, обеспечивая изменение концентрации носителей в зависимости от температуры по закону $T^{3/2}$. Е. К. Иорданишвили и Л. С. Стыльбанс произвели расчет ТЭЭЛ с переменным составом ветвей [29]. В практике используются пока ТЭЭЛ не с равномерно изменяющимся составом материала, а содержащие несколько соответственно подобранных участков ветви, каждый из которых содержит однородный материал.

Предположим, что ветвь термоэлемента состоит из трех материалов A , B , C , каждый из которых имеет значение Z , изменяющееся с температурой, как показано на рис. 2.9. Легко видеть, что среднее значение Z для ветви из трех таких материалов заметно выше, чем для ветви из какого-либо одного материала. Подобного рода ТЭЭЛ с ветвями, состоящими каждая из двух различных материалов, показан на рис. 2.10. ТЭЭЛ с ветвями из нескольких слоев ТЭМ называют *слоистыми ТЭЭЛ*.

Другой конструктивный вариант реализации идеи переменного состава ветвей — использование каскадной батареи, показанной на рис. 2.11. Здесь температурный перепад разбит на две (или более) части и в каждой температурной зоне работает ТЭЭЛ из материала, имеющего максимальную добротность в этой зоне. При этом каждый термоэлемент каскада должен быть электрически изолирован от элементов другого каскада, но иметь хороший тепловой

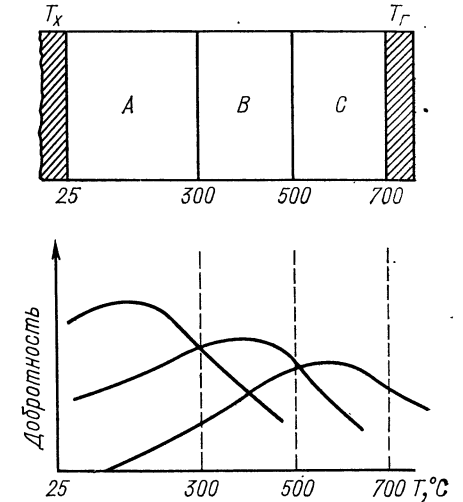


Рис. 2.9. Схема ветви слоистого ТЭЭЛ.

контакт с соответствующей поверхностью другого элемента. Для этой цели каскады должны быть отделены друг от друга хорошим изолятором, например тонкими пластинками слюды или другого диэлектрика. Такой ТЭЭЛ

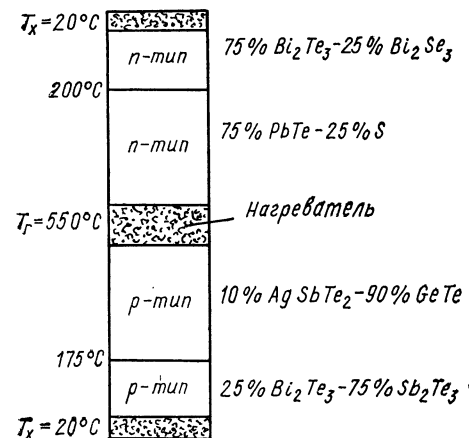


Рис. 2.10. Схема слоистого термоэлемента для получения к. п. д. 12%.

можно считать эквивалентным каскадной системе из двух батарей ТЭЭЛ А и Б, из которых одна (А) высокотемпературная. При этом все тепло, сбрасываемое высокотемпературным элементом, поступает на горячий спай низкотемпературного ТЭЭЛ через слой электрической изоляции И. Для предварительных оценок можно полагать, что отсутствует термическое сопротивление между элементами А и Б. Элемент А работает при разности температур $T_r - T_c$, а элемент Б — при $T_c - T_x$. Предполагаем, что паразитные потери тепла отсутствуют, тогда полезная электрическая мощность равна сумме полезных мощностей, развиваемых элементами А и Б, при затрате единицы тепла, т. е. в первом приближении к. п. д. слоистого ТЭЭЛ может быть определен как $\eta_{AB} = \eta_A + \eta_B$.

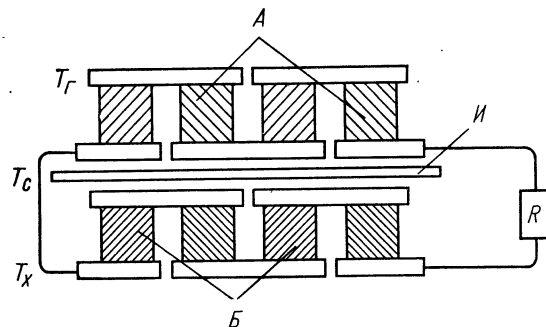


Рис. 2.11. Схема каскадной термоэлектрической батареи.

Например, если для высокотемпературной пары А из сплава кремний—германий $\eta_A = 0,06$, а для низкотемпературной пары из сплава теллуристого свинца $\eta_B = 0,08$, то для каскадного ТЭЭЛ в первом приближении $\eta_{AB} = 0,08 + 0,06 = 0,14$, т. е. 14%. В этой оценке к. п. д. слоистого ТЭЭЛ предполагалось, что к вы-

сокотемпературному и низкотемпературному слоям подводятся одинаковые количества тепла. Очевидно, что к элементу Б всегда подводится меньшее количество тепла на величину, равную количеству электроэнергии, выработанной в элементе А, т. е. $Q_c = Q_r (1 - \eta_A)$. Если учесть это обстоятельство, то количество электроэнергии, вырабатываемой элементом Б, составит $Q_r (1 - \eta_A) \eta_B$, а общий к. п. д.

$$\eta_{AB} = [Q_r \eta_A + Q_r (1 - \eta_A) \eta_B] / Q_r = \eta_A + \eta_B - \eta_A \eta_B.$$

Для указанного выше частного случая вместо к. п. д., равного 14%, получим

$$\eta_{AB} = 0,08 + 0,06 - 0,08 \cdot 0,06 = 0,135 = 13,5\%.$$

При использовании слоистых ТЭЭЛ различие механических характеристик материалов слоев и промежуточного коммутационного сплава может привести к растрескиванию ветвей ТЭЭЛ и, таким образом, к повышению его внутреннего сопротивления и другим дефектам. Часто возникает необходимость применять ветви различных длин и сечений, что усложняет конструкцию устройства.

В табл. 2.5 приведены некоторые расчетные и экспериментальные варианты слоистых ТЭЭЛ. Следует иметь в виду, что к. п. д. указанных в таблице слоистых ТЭЭЛ измерены в лабораторных условиях. Расчет таких каскадных батарей подробно рассмотрен В. А. Кремневым и Д. Е. Герониным [30].

Следует заметить, что само по себе каскадирование ТЭЭЛ, как показал А. И. Бурштейн [36], не может повлиять на увеличение к. п. д. ТЭЭЛ. За счет уменьшения степени необратимости процесса (при уменьшении перепада температуры на одном ТЭЭЛ в случае большого количества каскадов) к. п. д. может быть увеличен на 5—10% при рабочей разности температур 300—600° С. Учитывая, что практически можно применять лишь 2—3 каскада, а также принимая во внимание неиспользуемый перепад температур между каскадами, можно заключить, что само по себе каскадирование вряд ли целесообразно.

Однако каскадирование может быть использовано для повышения среднего значения добротности в 2—3 раза. При этом к. п. д. может быть существенно увеличен.

Е. К. Иорданишвили и Л. С. Сильбанс [29] рассчитали и испытывали простые и слоистые ТЭЭЛ с ветвями из различных материалов. Один ТЭЭЛ, работающий в интервале температур 450—600° С, имел $\alpha_p = 140$ мкВ/град, $\sigma_p = 2200$ (ом·см)⁻¹, $\alpha_n = 145$ мкВ/град, $\sigma_n = 1100$ (ом·см)⁻¹ и $\eta_T = 2,8\%$. Другой ТЭЭЛ при работе в интервале 300—450° С имел $\alpha_p = 230$ мкВ/град, $\sigma_p = 750$ (ом·см)⁻¹, $\alpha_n = 200$ мкВ/град, $\sigma_n = 800$ (ом·см)⁻¹ и показал $\eta_T = 5,3\%$. Собранный из этих элементов слоистый ТЭЭЛ при работе в интервале 300—600° С имел $\eta_T = 7,8\%$. После дополнительного увеличения перепада температур между слоями был получен к. п. д. 8,1%, что соответствует добротности $1,53 \cdot 10^{-3}$ (град)⁻¹.

Варианты слоистых ТЭЭЛ

Характеристики	1-й слой	2-й слой	3-й слой	4-й слой	К. п. д., %	Литература
<i>n</i> -ветвь	$\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Bi}_2\text{Se}_3$	—	—	—	Расчет 7,4 Эксперимент 6,6	[30]
$t_{\Gamma} - t_{\text{X}}, ^\circ\text{C}$	251—30	—	—	—		
<i>p</i> -ветвь	$\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Sb}_2\text{Te}_3$	—	—	—		
$t_{\Gamma} - t_{\text{X}}, ^\circ\text{C}$	251—30	—	—	—		
<i>n</i> -ветвь	75% $\text{Bi}_2\text{Te}_3 +$ + 25% Bi_2Se_3	75% $\text{PbTe} +$ + 25% SnTe	—	—	Расчет 14,0 Эксперимент 12,0	[31]
$t_{\Gamma} - t_{\text{X}}, ^\circ\text{C}$	200—20	550—200	—	—		
<i>p</i> -ветвь	25% $\text{Bi}_2\text{Te}_3 +$ + 75% Sb_2Te_3	10% $\text{AgSbTe}_2 +$ + 90% GeTe	—	—		
$t_{\Gamma} - t_{\text{X}}, ^\circ\text{C}$	175—20	550—175	—	—		
<i>n</i> -ветвь	—	—	$\text{MCC} - 40 +$ $+\text{ThO}_2, \text{As}$	$\text{MCC} - 60 + \text{CaO},$ $\text{ThSi}_2, \text{CoSi}$	Расчет 4,0	[32]
$t_{\Gamma} - t_{\text{X}}, ^\circ\text{C}$	—	—	850—500	1200—850		
<i>p</i> -ветвь	—	—	$\text{MCC} - 40 + \text{CaO}, \text{B}$	$\text{MCC} - 50 + \text{CaO}$		
$t_{\Gamma} - t_{\text{X}}, ^\circ\text{C}$	—	—	850—500	1200—850		

<i>n</i> -ветвь	Bi_2Te_3	Bi_2Se_3	$\text{PbTe} + \text{PbSe}$	—	Расчет 14,0	[33]
$t_{\Gamma} - t_{\text{X}}, ^\circ\text{C}$	150—50	270—150	660—270	—		
<i>p</i> -ветвь	$\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Sb}_2\text{Te}_3$	GeTe	PbSe	—		
$t_{\Gamma} - t_{\text{X}}, ^\circ\text{C}$	310—50	530—310	660—530	—		
<i>n</i> -ветвь	$\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Bi}_2\text{Se}_3$	$\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Bi}_2\text{Se}_3$	PbSe	PbSe	Расчет 12,8	[34]
$t_{\Gamma} - t_{\text{X}}, ^\circ\text{C}$	170—20	320—170	540—320	700—540		
<i>p</i> -ветвь	$\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Sb}_2\text{Te}_3$	PbSe	PbSe	—		
$t_{\Gamma} - t_{\text{X}}, ^\circ\text{C}$	250—20	450—250	700—450	—		
<i>n</i> -ветвь	80% $\text{Bi}_2\text{Te}_3 +$ + 20% Bi_2Se_3	PbSe	75% $\text{PbTe} +$ + 25% SnTe	—	Эксперимент 10—14 при $t_{\Gamma} =$ $= 600 - 700 ^\circ\text{C}$	[35]
$t_{\Gamma} - t_{\text{X}}, ^\circ\text{C}$	200—50	450—200	600—450	—		
<i>p</i> -ветвь	80% $\text{Sb}_2\text{Te}_3 +$ + 20% $\text{Bi}_2\text{Te}_3 +$ + 6% Te	—	95% $\text{GeTe} +$ + 5% Bi_2Te_3	—		
$t_{\Gamma} - t_{\text{X}}, ^\circ\text{C}$	200—50	—	600—200	—		

Высокие результаты получены Л. А. Коломойцем и др. на слоистом ТЭЭЛ с ветвями из халькогенидов Bi, Sb, Pb и Ge. При работе в интервале температур 50—700° С получен к. п. д. 13,5%. В другом случае Е. К. Иорданишвили и др. [9] изучал ТЭЭЛ на основе кремний — германия в интервале температур 150—1100° С и получил к. п. д. 8,5%.

На рис. 2.10 показана описанная в работе [31] схема слоистого ТЭЭЛ, указан состав материалов и их рабочие температуры. На холодном конце контакт металл — полупроводник обеспечивался пайкой, а на горячем конце — прижимом. Испытания проводились в атмосфере аргона. По характеристикам указанных материалов при разности температур 530° С к. п. д. должен был составить 14%, а фактически измеренный оказался равным 12%. После 300 ч работы к. п. д. снизился на 20% вследствие увеличения контактного сопротивления металл — полупроводник.

Применение слоистых ТЭЭЛ открывает перспективы значительного повышения к. п. д. ТЭГ. Так, Е. К. Иорданишвили [10] указал на возможность получения к. п. д. ТЭЭЛ, близкого к 20%, при использовании слоев из тройных сплавов типа PbTe, сплавов GeSi и других, в интервале температур 30—1000° С. Другие авторы также считают возможным доведение в будущем к. п. д. ТЭГ до 20% при помощи слоистых ТЭЭЛ из Bi₂Te₃, ZnCdSb и GeSi.

§ 2.5

Расчет ТЭЭЛ

При расчете простого (однослойного) ТЭЭЛ, а тем более многослойного, должны быть учтены изменения характеристик ТЭМ с температурой. При определении к. п. д. ТЭЭЛ необходимо учитывать тепло Пельтье, Томсона и Джоуля, а также согласование электрических характеристик по длине ветвей. Для расчета ТЭЭЛ необходимо знать температурные зависимости α , ρ , κ для каждого ТЭМ, входящего в ТЭЭЛ.

Если распределение температуры вдоль ветвей ТЭЭЛ нелинейно и электропроводность зависит от температуры, то применение осредненных значений электросопротивления и теплопроводности, как указал Е. К. Иорданишвили [33], может привести к заметным отклонениям от истинных значений. Только значения ТЭДС будут всегда правильными, поскольку ТЭДС — функция разности температур спаев. В таких случаях среднеинтегральные значения ρ и κ нужно определять одновременным интегрированием их произведения с учетом имеющейся температурной зависимости, рассматривая ветвь ТЭЭЛ как ряд последовательно соединенных тепловых и омических сопротивлений. Например, для ТЭЭЛ с p -ветвью из PbTe, имеющей в интервале температур от 300 до 800° К резко выраженную зависимость κ и ρ от температуры, оказалось, что реальная ве-

личина Z на 27% больше вычисленной на базе среднеинтегральных значений α , ρ и κ . При меньшем температурном интервале или в случае более слабой температурной зависимости ρ и κ (например, у сплавов на основе Bi₂Te₃) этот эффект выражен слабее. На конечных стадиях расчетов ТЭЭЛ и при анализе результатов экспериментальных работ следует учитывать возможное влияние этого эффекта.

Другим существенным эффектом, который часто не учитывается в предварительных расчетах ТЭЭЛ, является тепло Томсона. Результаты исследований показали, что тепло Томсона особенно важно учитывать при высоких температурах горячих спаев ТЭЭЛ.

На рис. 2.12 показано уменьшение к. п. д. ТЭЭЛ из-за влияния тепла Томсона в сравнении со случаем, когда $\tau = 0$. С ростом температуры горячего спая уменьшается к. п. д. ТЭЭЛ, причем для исследованных образцов это снижение к. п. д. достигает 10—15% при T_r около 500° С [32].

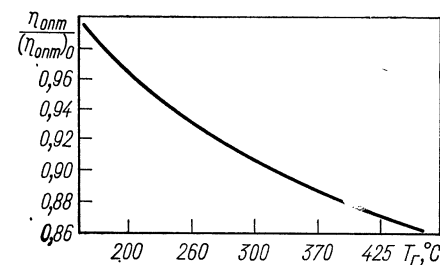


Рис. 2.12. Пример снижения к. п. д. ТЭЭЛ вследствие влияния тепла Томсона.

Существенное практическое значение имеет рассогласование электрических характеристик ТЭЭЛ, рассмотренное в работе Е. К. Иорданишвили [9]. Наблюдались случаи понижения (вместо повышения) к. п. д. ТЭЭЛ при увеличении рабочего интервала температур, например, на термопаре ZnSb — константан, для некоторых ТЭЭЛ с тройными сплавами.

Явление объясняется тем, что электрическое сопротивление некоторых ТЭМ имеет сильную температурную зависимость: при увеличении температуры ТЭМ выбранная величина тока $I = E/(R + r)$ может сильно отличаться от оптимального значения. В среднем ток может даже оставаться оптимальным для ТЭЭЛ, но в горячих и холодных частях ветви сильно отличаться от оптимального. Подобное явление имеет место, например, в батарее последовательно включенных аккумуляторов с различными внутренними сопротивлениями. В силу такого рассогласования режимов работы часть электрической мощности, которая ранее отдавалась на нагрузку, превращается в избыточное тепло Джоуля, снижая общий к. п. д. ТЭЭЛ. Рассогласование может усиливаться вследствие температурной зависимости теплопроводности, когда увеличение теплопроводности горячих участков ветви ведет к увеличению длины участка ветви с повышенной температурой, на котором возрастает электросопротивление.

Еще больше рассогласование проявляется в слоистых ТЭЭЛ, где оно зависит от числа слоев и связано с различиями в характеристиках ТЭМ. Как правило, в слоистых ТЭЭЛ ни один слой не ра-

ботает в оптимальном режиме. В среднем, вследствие рассогласования, в слоистых ТЭЭЛ к. п. д. снижается на 7—10%.

В обычном однослойном ТЭЭЛ на основе $\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Bi}_2\text{Se}_3$ (n -ветвь) и $\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Sb}_2\text{Te}_3$ (p -ветвь) в интервале температур от 50 до 300° С внутреннее рассогласование одного материала ведет к снижению к. п. д. ($\eta/\eta_{\text{макс}} = 0,975$). Для одного из трехслойных ТЭЭЛ, указанного в табл. 2.5, рассогласование определено коэффициентом $\eta/\eta_{\text{макс}} = 0,946$, т. е. к. п. д. составляет 14,1% вместо 15%.

В ТЭЭЛ на основе SiGe в интервале температур от 330 до 870° С ввиду слабой зависимости ρ и κ от температуры внутреннее рассогласование составляет около 0,99. Однако при увеличении температуры до 1050—1150° С рассогласование заметно увеличивается, достигая значений 0,93—0,95 [9]. Наличие дополнительного омического сопротивления в контактах горячих и холодных спаев ТЭЭЛ уменьшает полезную мощность и к. п. д. ТЭГ, поскольку часть энергии дополнительно выделяется на контактах в виде тепла Джоуля. Поэтому для получения оптимального к. п. д. сопротивление полезной нагрузки следует увеличить на омическое сопротивление контактов r_k .

Однако с ростом сопротивления полезной нагрузки оптимальный к. п. д. медленно падает. При расчетах общего сопротивления цепи контактные сопротивления следует включать в сопротивление ветвей ТЭЭЛ. При этом добротность будет равна

$$Z' = \frac{Z}{1 + (\Sigma r_k/r)} = \frac{\alpha^2}{\kappa \rho [1 + (\Sigma r_k/r)]}.$$

Коэффициент полезного действия слоистого термоэлемента может быть определен по формуле

$$\eta_{\text{макс}} = \frac{T_r - T_x}{\beta T_r} \cdot \frac{M - 1}{(M + 1)(1 - b) - 2a},$$

где β , b , a — коэффициенты, учитывающие доли тепла Джоуля, Томсона, Пельтье, возвращающиеся к горячему спаю [36].

Термоэлектрические характеристики некоторых ТЭМ имеют сложную температурную зависимость и не могут быть выражены в монотонных функциях для всего рабочего интервала температур. В таких случаях указанные коэффициенты обычно определяют по среднеарифметическим величинам α , ρ , κ , полученным путем разбиения соответствующих экспериментальных кривых на температурные участки от 10 до 30° С каждый.

В работе [37] приводится расчет к. п. д. идеального электрического согласованного ТЭГ с учетом эффектов Пельтье и Томсона для случая бесконечного числа слоев ТЭМ в ТЭЭЛ. Для учета электрического рассогласования элементов ветви ТЭЭЛ следует вводить коэффициент $\eta/\eta_{\text{макс}}$, учитывающий отношение к. п. д. рассогласованного и согласованного ТЭЭЛ.

В работе Е. К. Иорданишвили [9] приведены практические рекомендации по точному расчету указанными выше методами к. п. д. слоистого ТЭЭЛ с учетом температурной зависимости параметров, входящих в Z , электрического рассогласования и неравномерного распределения теплоты Джоуля и Пельтье в местах спаев и теплоты Томсона в объеме ветвей. Расчеты слоистого термоэлемента приведены в работе [35], расчеты характеристик ТЭГ — в работах [27, 38—40]. Экспериментальные методы определения добротности Z готового ТЭЭЛ имеют большое практическое значение.

Один из таких методов был предложен И. С. Лискером [41]. Метод основан на измерении теплопроводности образца ТЭЭЛ, подвергнутого воздействию теплового потока при нулевом токе и токе короткого замыкания. Величина Z определяется из отношения разности полученных значений теплопроводности к теплопроводности при нулевом токе. Вариационные методы экспериментального исследования теплофизических и электрофизических свойств полупроводниковых материалов подробно описаны в работе [42].

В работе [43] предложен метод измерения добротности Z в готовых конструкциях ТЭЭЛ и целых ТЭГ по нагрузочным характеристикам ТЭЭЛ при постоянном тепловом потоке. Метод основан на том, что при протекании электрического тока через ТЭЭЛ часть подведенного теплового потока передается от горячего спаю к холодному за счет эффекта Пельтье, пропорционального току. При постоянной величине теплового потока с увеличением тока (т. е. с уменьшением нагрузочного сопротивления) уменьшается доля теплового потока, передаваемого за счет теплопроводности. С увеличением тока нагрузки перепад температур на ТЭЭЛ уменьшается от $\Delta t_{x,x}$ (x, x — холостой ход) при $I = 0$ и $m = \infty$ до $\Delta t_{k,3}$ ($k, 3$ — короткое замыкание) при $I = I_{k,3}$ и $m = 0$. В этом случае тепловой баланс ТЭЭЛ можно записать $Q_r = Q_k + Q_\pi - 0,5 Q_{дж}$, где Q_r — тепловой поток, подведенный к горячему спаю; Q_k — тепловой поток, идущий по ветвям; $Q_{дж}$ — тепло Джоуля; Q_π — тепло Пельтье, поглощаемое в горячем спае. Пользуясь обычными выражениями для тепловых потоков, запишем

$$\frac{Q_r}{Q_k} = \frac{q_1}{q_2} = 1 + \frac{Z T_r}{m + 1} - \frac{Z \Delta t}{2(m + 1)^2} = 1 + Z \frac{T_{cp} + m T_r}{(m + 1)^2},$$

где q_1 и q_2 — плотности тепловых потоков Q_r и Q_k , отнесенные к 1 м² поверхности полупроводникового вещества ТЭЭЛ, вт/м^2 ; Z — добротность; $\Delta t = T_r - T_x$ — перепад температуры на ТЭЭЛ; $m = R/r$ — отношение электрических сопротивлений нагрузки (R) и ТЭЭЛ (r).

Как следует из приведенного выше уравнения, в режиме холостого хода при $m = \infty$ плотности потоков равны

$$q_{1x,x} = q_{2x,x} = (\kappa_{cp,x,x}/\delta) \Delta t_{x,x},$$

где κ_{cp} — среднее значение коэффициента теплопроводности ТЭЭЛ, $\text{вт/(м} \cdot \text{град)}$; δ — высота ветвей ТЭЭЛ, м .

Для режима короткого замыкания, когда $m = 0$, из приведенного выше уравнения получаем

$$q_{1к.з} = q_{2к.з} (1 + Z_{к.з} T_{ср.к.з}) = \frac{\kappa_{ср.к.з}}{\delta} \Delta t_{к.з} (1 + Z_{к.з} T_{ср.к.з}).$$

Если к ТЭЭЛ подводится одинаковый тепловой поток, т. е. $q_{1х.х} = q_{1к.з}$, то

$$1 + Z_{к.з} T_{ср.к.з} = (\Delta t_{х.х} / \Delta t_{к.з}) (\kappa_{ср.х.х} / \kappa_{ср.к.з}).$$

Отсюда получаем выражение для определения добротности:

$$Z_{к.з} = \frac{1}{T_{ср.к.з}} \left(\frac{\Delta t_{х.х}}{\Delta t_{к.з}} \cdot \frac{\kappa_{ср.х.х}}{\kappa_{ср.к.з}} - 1 \right).$$

При малых Δt можно считать, что $\kappa_{ср.х.х} = \kappa_{ср.к.з}$ и тогда

$$Z_{к.з} = (1/T_{ср.к.з}) [(\Delta t_{х.х} / \Delta t_{к.з}) - 1].$$

Таким образом, оказывается возможным определить добротность ТЭЭЛ по разности температур спаев при холостом ходе и в режиме короткого замыкания. Важно лишь обеспечить постоянство теплового потока. Погрешность результата зависит от точности определения параметров и прецизионности приборов. При хороших приборах погрешность может быть порядка 10%.

§ 3.1.

Тепловая эффективность установок ТЭГ

Большое влияние на эффективность термоэлектрического цикла оказывает конструктивная схема термоэлектрической установки, т. е. особенности подвода и отвода тепла, свойства топлива, потери во вспомогательных устройствах и т. д.

Схема простейшей термоэлектрической установки показана на рис. 3.1. Установка ТЭГ состоит из батареи ТЭЭЛ, устройства для получения и подвода тепла к горячим спаям при температуре T_r , устройства для отвода тепла от холодных спаев при температуре T_x , полезной нагрузки R и других (вспомогательных) узлов установки. Общий к. п. д. такой установки (если принять за к. п. д. установки отношение количества отданной потребителю электроэнергии к общему количеству тепловой энергии топлива) определяется не только к. п. д. ТЭЭЛ, но и конструктивными особенностями установки ТЭГ, которые зависят от следующих факторов: мощности ТЭГ; источника тепла (твердое, газообразное или жидкое топливо, ядерное горючее, солнечная энергия и др.); способа подвода и отвода тепла (теплопроводность, конвекция, лучеиспускание); теплоносителя (вода, газы, жидкие металлы); характеристик отдаваемого потребителю электрического тока (постоянный, переменный, низкое, высокое напряжение) и др. Тогда общий к. п. д. установки с ТЭГ может быть представлен в виде

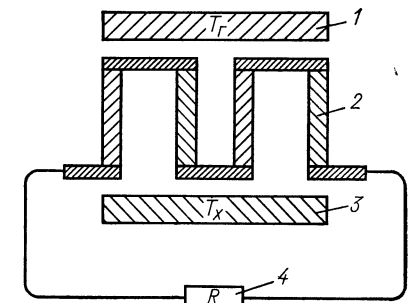


Рис. 3.1. Схема простейшей установки ТЭГ:

1 — источник тепла при температуре T_r ; 2 — ТЭЭЛ; 3 — охлаждающее устройство при температуре T_x ; 4 — полезная нагрузка ТЭГ.

$$\eta_a = \eta_T \eta_{\Pi} = \eta_K \eta_z \eta_{\Pi} \quad \text{и} \quad \eta_z = \eta_T / \eta_K,$$

где η_K — к. п. д. цикла Карно; η_z — к. п. д. ТЭМ, характеризующий влияние Z и T , включая потери в контактах и прочие потери в ветвях и η_{Π} — к. п. д., характеризующий подвод тепла, охлаждение, потери электрической мощности.

Потери энергии в установке ТЭГ обуславливаются следующими причинами: в процессе подвода тепла — из-за перепада температуры между теплоносителем и горячим спаем ТЭЭЛ, в результате затраты мощности на подвод теплоносителя и т. д.; при отводе тепла с холодных спаев ТЭЭЛ — из-за перепада температур между охлаждающим агентом и холодными спаями, из-за затрат мощности на циркуляции теплоносителя; из-за потерь тепла через лучеиспускание и конвекцию от теплоподводящих устройств и самих ТЭЭЛ (потери тепла ТЭЭЛ в окружающее пространство эквивалентны увеличению теплопроводности ветвей ТЭЭЛ); как результат уменьшения полезной электрической мощности вследствие потерь в распределительных шинах, преобразователях и других устройствах. Указанные обстоятельства могут приводить к значительному уменьшению коэффициента подвода тепла $\eta_{\text{п}}$ (вплоть до 0,1 и менее) в ТЭГ небольшой мощности на твердом топливе без регенерации тепла. В крупных установках на радиоактивных изотопах и ядерных реакторах коэффициент подвода тепла может быть 0,9 и выше.

Ниже рассмотрены различные схемы установок ТЭГ, включая сочетание ТЭГ с другими энергетическими установками для повышения суммарной эффективности (вследствие увеличения к. п. д. подвода тепла $\eta_{\text{п}}$). При этом следует иметь в виду, что эффективность самого ТЭЭЛ, т. е. $\eta_{\text{т}} = \eta_{\text{к}}\eta_{\text{з}}$, не может быть повышена уменьшением потерь в процессе подвода тепла к ТЭЭЛ, поскольку при этом остается без изменения процесс преобразования тепловой энергии в электрическую.

§ 3.2

ТЭГ с регенерацией тепла

В простейших небольших ТЭГ с нагревом горячих спаев ТЭЭЛ продуктами сгорания топлива и удалением лишь слегка охладившихся продуктов в атмосферу имеют место огромные потери тепла. Например, если продукты сгорания топлива в воздухе имеют температуру 500°C и, проходя горячие спаи, охлаждаются на 100°C , то приблизительно 80% тепла топлива выбрасывается с уходящими газами. Даже если не учитывать другие факторы, уменьшающие использование тепла, в этом случае к. п. д. установки составит $\eta_{\text{п}} = 0,2$. Если к. п. д. этого полупроводникового ТЭЭЛ 3%, то общий к. п. д. рассматриваемой установки ТЭГ оказывается равным $\eta_{\text{э}} = 0,03 \cdot 0,2 = 0,006 = 0,6\%$. Существенное уменьшение таких потерь тепла может быть достигнуто *регенерацией тепла* — использованием отработанных продуктов сгорания топлива. Регенерация может быть осуществлена с помощью теплообменников, или *регенераторов*, подобных тем, которые используются в доменных печах. В некоторых конструкциях ТЭГ имеются устройства, в большей или меньшей степени осуществляющие подогрев холодного воздуха.

Повышение к. п. д. ТЭГ в результате регенерации тепла, т. е. методами общей теплотехники, рассматривалось многими авторами. Существуют расчеты, в которых для увеличения к. п. д. ТЭГ предусматривается пропускание охлаждающего газа, например воздуха или смеси воздуха с горючим газом, через каналы в ТЭГ с последующим использованием нагретого воздуха для отопления или процесса горения [1, 2].

Очевидно, что регенерация тепла, не влияя на к. п. д. собственно ТЭЭЛ, имеет большое практическое значение в ТЭГ, работающих на обычном топливе (уголь, жидкое и газообразное топливо). Подогрев вводимых в камеру сгорания ТЭГ топлива и воздуха за счет тепла отходящих продуктов сгорания существенно повышает эффективность использования тепла, подводимого к ТЭЭЛ.

Если температура горячего спая лимитируется только температурой горения топлива, применение регенерации дает возможность увеличить температуру $T_{\text{г}}$ за счет повышения температуры продуктов сгорания и таким образом повысить общую эффективность ТЭГ.

В тех случаях, когда существенную роль играет расход топлива и общий к. п. д. установки, должны быть приняты меры к осуществлению регенерации тепла.

Следует также отметить, что в ТЭГ на изотопных источниках тепла и ядерных реакторах, не имеющих продуктов сгорания, отсутствует источник больших потерь тепла, что, в принципе, может обеспечить получение в таких установках более высокого к. п. д. $\eta_{\text{п}}$. Коэффициент полезного действия подвода тепла в этих генераторах может быть доведен даже в маленьких ТЭГ до 0,8—0,9.

Поиски путей улучшения эффективности термоэлектрического цикла с помощью обычных теплотехнических методов привели к регенеративной схеме подвода тепла к горячим и холодным спаям ТЭЭЛ.

На рис. 3.2 показана предложенная в 1932 г. Л. Н. Старостиным система, в которой тепло, отводимое от холодных спаев ТЭЭЛ, используется для нагревания теплоносителя [3]. Такой ТЭГ имеет замкнутый контур, по которому циркулирует теплоноситель. Нагретый теплоноситель отдает тепло горячим спаям ТЭЭЛ, после чего направляется в холодильник, где доохлаждается, затем охлаждает холодные концы ТЭЭЛ, сам постепенно нагреваясь. Пройдя всю батарею ТЭЭЛ, теплоноситель поступает в нагревательное ус-

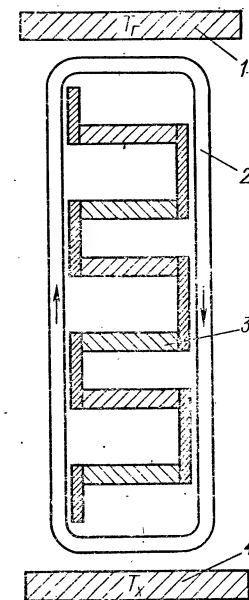


Рис. 3.2. ТЭГ с регенеративной схемой подвода тепла:
1 — источник тепла; 2 — контур циркуляции теплоносителя; 3 — ТЭЭЛ; 4 — холодильник.

ройство, где нагревается до первоначальной температуры цикла. В этой схеме один и тот же теплоноситель служит как для нагревания, так и для охлаждения ТЭЭЛ. Здесь все ТЭЭЛ работают при различных, постепенно повышающихся температурах. Разность температур между горячим и холодным концами ТЭЭЛ в простейшем случае равна догреву и доохлаждению теплоносителя в источниках тепла и холода.

Детальные расчеты, выполненные А. И. Бурштейном, показали, что в такой схеме ТЭЭЛ работают в обычном цикле и их к. п. д. не может быть выше, чем у ТЭЭЛ, непосредственно работающих на полной разности температур источников тепла и холода, если термоэлементы изготовлены из ТЭМ, имеющих одинаковую среднюю добротность при рабочей температуре. Однако к. п. д. ТЭГ в такой регенеративной схеме может быть значительно улучшен, если использовать несколько материалов, имеющих каждый наибольшую добротность в соответствующем температурном интервале. Такая регенеративная схема открывает возможность использования большого набора ТЭМ, замены одних материалов другими и т. п. От слоистого ТЭЭЛ такая регенеративная схема отличается более простым процессом изготовления ТЭЭЛ, а от каскадной батареи — простотой монтажа.

§ 3.3.

ТЭГ для получения переменного тока

В некоторых случаях необходимо получать переменный электрический ток с целью преобразования его в ток более высокого напряжения. Одно из возможных решений того вопроса — применение вибропреобразователя.

На рис. 3.3 показана одна из простейших схем термоэлектрической установки с вибропреобразователем. Здесь ТЭГ подключен к первичной обмотке трансформатора. В случае использования вибропреобразователя ВП-1 при среднем токе в первичной цепи 0,33 а и напряжении 6 в во вторичной обмотке можно получить ток 10—12 ма при 110 в, т. е. к. п. д. такого простейшего вибропреобразователя около 60% [4].

Для ТЭГ мощностью в несколько киловатт может быть использован машинный преобразователь постоянного тока в переменный или более совершенная схема модулирования тока. В этом случае потери могут быть уменьшены в несколько раз посредством усовершенствования преобразующего устройства. Использование преобразователя тока приводит к снижению к. п. д. ТЭГ из-за понижения среднего значения тока (сила тока изменяется за один период от нуля до максимума), а расход тепла при этом остается практически без изменения (пульсацией, обусловленной эффектом Пельтье, можно пренебречь). Из-за существенного снижения к. п. д. и усложнения

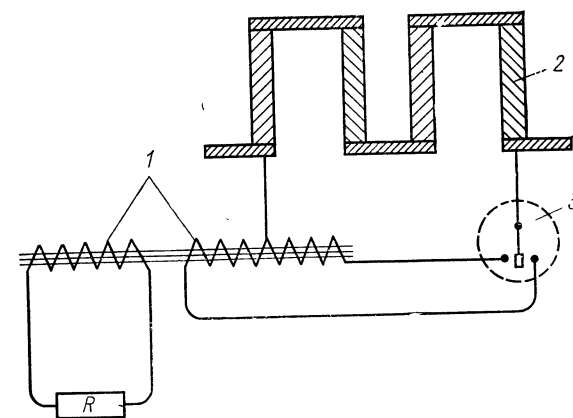


Рис. 3.3. Схема установки ТЭГ с вибропреобразователем напряжения:

1 — трансформатор; 2 — ТЭЭЛ; 3 — прерыватель тока.

конструкции преобразование тока ТЭГ малых мощностей обычно не применяется.

Переменный ток в термогенераторах можно получать с помощью периодического нагревания и охлаждения спаев ТЭЭЛ. Разработаны различные конструкции подобных ТЭГ. А. Х. Черкасским была предложена идея такого ТЭГ переменного тока. В одном из вариантов предусматривалось применение вращающихся батарей ТЭЭЛ с соответствующими коллекторами для получения постоянного или переменного тока [5]. Устройство, основанное на использовании теплового потока, периодически обтекающего горячие спаи ТЭЭЛ, исследовалось также в США [6]. Принципиальная схема одного из таких ТЭГ показана на рис. 3.4. Тонкие пленки полупроводников *n*- и *p*-типов образуют термоэлектрическую цепь, которая вплетена в диэлектрик таким образом, что горячие спаи находятся на одной стороне, а холодные — на другой. Если такой ТЭГ вращается или источники тепла и холода движутся вокруг ТЭГ, спаи периодически нагреваются и охлаждаются и в цепи возникает переменный ток.

Была построена модель термоэлектрического генератора с использованием теллуристого свинца и диэлектрика, устойчивого к нагреванию. Последовательно соединенные полоски термоэлектрика были

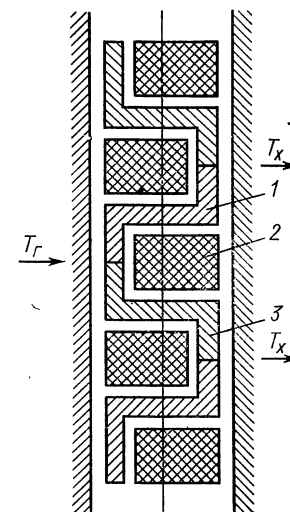


Рис. 3.4. Схема ТЭГ переменного тока (с периодическим нагревом):

1 — *p*-ветвь; 2 — диэлектрик; 3 — *n*-ветвь.

смонтированы на противоположных сторонах барабана, при вращении которого эти полосы попеременно обдувались то горячей, то холодной струей воздуха.

Для системы из 16 последовательно соединенных термопар телуристого свинца получены кривые термоэлектрического напряжения с частотой $0,5 \text{ сек}^{-1}$ (рис. 3.5).

В результате расчетов и обработки экспериментальных данных возможный к. п. д. ТЭГ такой системы оценен в 8—11%. Авторы сделали вывод, что ТЭГ переменного тока подобной конструкции можно считать перспективным в отношении к. п. д. и при использовании его в сочетании с периодически меняющимся тепло-

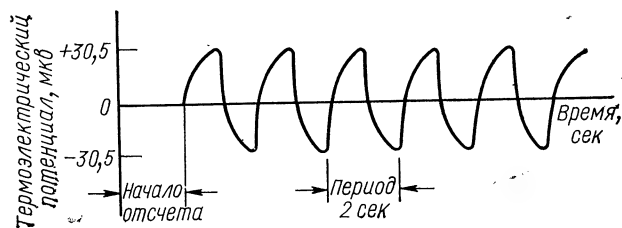


Рис. 3.5. Осциллограмма переменного тока ТЭГ с 16 ТЭЭЛ.

вым потоком. Этот способ получения переменного тока не вносит улучшений в термодинамику ТЭЭЛ по сравнению с ТЭГ постоянного тока при той же разности температур. Следует учитывать, что процесс преобразования идет при более низкой средней разности температур. Конструктивное оформление установки довольно сложно, и потери в подводе и отводе тепла могут быть существенными. Тем не менее данная схема демонстрирует одну из принципиальных возможностей термоэлектрического метода в области получения переменного тока.

К этой же группе можно отнести и японский патент на кольцеобразную термоэлектрическую батарею с последовательным нагревом ТЭЭЛ. Термобатарея служит первичной обмоткой трансформатора, генерирующего переменный ток [7].

§ 3.4

ТЭГ с пониженной температурой холодных спаев

Один из способов улучшения к. п. д. ТЭЭЛ — понижение температуры холодных спаев ветвей. При отрицательных температурах добротность некоторых ТЭМ достигает высоких значений.

Охлаждение ТЭЭЛ испаряющейся жидкостью является эффективным методом теплоотвода. При этом пар можно конденсировать в соответствующем теплообменнике и вновь направлять жидкость

в испаритель без применения насосов или других механизмов. Основными узлами такого устройства являются: испаритель, в котором жидкость находится в контакте с холодными спаями и испаряется и конденсатор, охлаждаемый холодной водой и устроенный так, что жидкость самотеком поступает в испаритель.

Эта схема описана в работе [8], где в качестве хладагента применялся фреон-113 (температура кипения 47°С при давлении 1 атм). Теплообменник был изготовлен из алюминиевых труб, расположенных с наклоном 30° для обеспечения стекания конденсата в испаритель.

Во время лабораторных испытаний теплообменник работал в установившемся режиме при разрежении 165 мм рт. ст. При этом температура кипения фреона и холодных спаев ТЭЭЛ была около 40°С (вместо $70\text{—}80^\circ \text{С}$ на ТЭГ более ранней конструкции), температура окружающей среды 25°С и температура горячего спая 275°С .

В этих опытах мощность ТЭЭЛ достигала 7,7 Вт, вместо 4,8 Вт в старой конструкции. По расчетам ожидалось увеличение мощности на 31% (без учета изменения α и κ от температуры), в действительности наблюдалось увеличение мощности на 61%.

Интересные результаты получены в опытах по применению жидкого воздуха или азота для отвода тепла с холодных спаев ТЭЭЛ. При этом достигались значительные к. п. д. собственно ТЭЭЛ за счет увеличения рабочей разности температур, повышения к. п. д. цикла Карно и использования большой добротности ТЭМ при низких температурах. Очевидно, что ТЭГ с отводом тепла жидкими газами могут иметь специальное назначение, например, для кратковременного получения больших токов.

В работе [9] рассмотрена возможность использования ТЭГ с охлаждением холодных спаев жидким азотом для питания сверхпроводящих соленоидов током 20—35 А. ТЭГ в данном случае исключает скачкообразное изменение тока, могущее вызвать нагревание соленоида и вывод его из сверхпроводящего состояния.

На рис. 3.6 показана конструкция ТЭГ для питания соленоидов, состоящая из девяти ТЭЭЛ, соединенных последовательно и установленных на медном основании (электрически изолированном от ТЭЭЛ), охлаждаемом жидким азотом. При $T_{\text{г}} = 50^\circ \text{С}$ и $T_{\text{х}} = -196^\circ \text{С}$, ТЭЭЛ диаметром 7,55 мм и высотой 4 мм из халькогенидов висмута и сурьмы с сопротивлением нагрузки $16 \cdot 10^{-3} \text{ ом}$ был получен «условный к. п. д.» около 12%. Ток в соленоиде при этом был 21,6 А. Расход жидкого азота на охлаждение холодных спаев составил около 6 л/ч при площади ТЭЭЛ около 20 см^2 .

Глубокое охлаждение требует больших затрат энергии на ожижение газов, снижая тем самым общую эффективность установки. Вместе с тем понижение температуры холодных спаев без больших затрат энергии — реальное средство повышения к.п.д. установки ТЭГ, в особенности при низких $T_{\text{г}}$.

Короткозамкнутый ТЭГ

Представление о термоэлектрической паре в некоторых случаях иллюстрируется лабораторным короткозамкнутым ТЭЭЛ, показанным на рис. 3.7. Изогнутая медная проволока имеет переключку

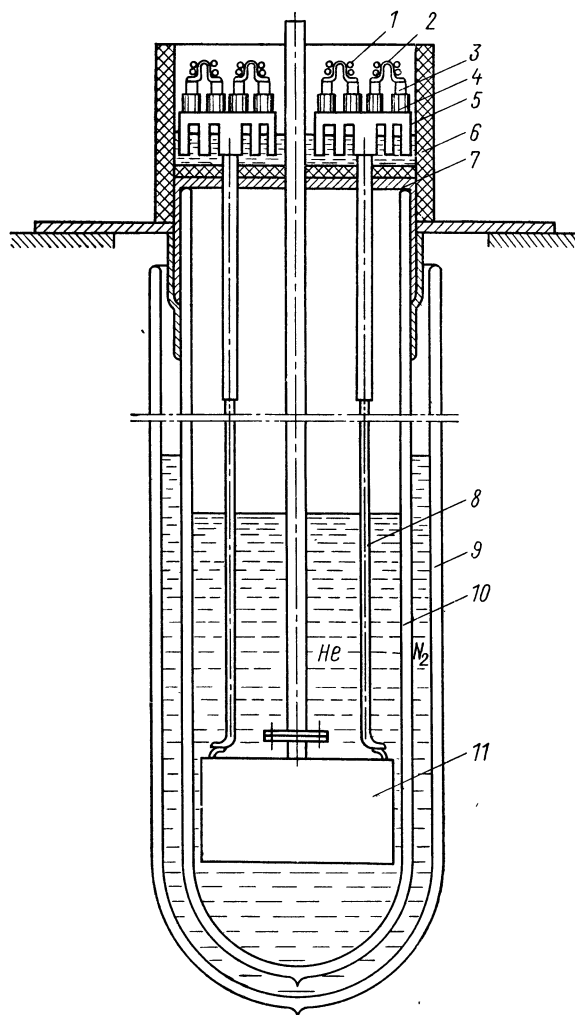


Рис. 3.6. Конструктивная схема ТЭГ для питания сверхпроводящих соленоидов:

1 — нагреватель из константана, намотанный на переключку 2; 2 — коммутационные переключки из меди; 3 — термоэлементы; 4 — изоляторы; 5 — основание из меди; 6 — стакан из пенопласта; 7 — крышка криостата; 8 — токоподводы; 9 — сосуд Дьюара с азотом; 10 — сосуд Дьюара с гелием; 11 — соленоид.

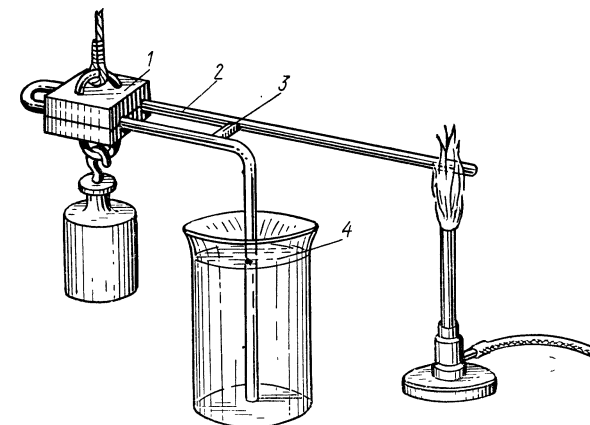


Рис. 3.7. Короткозамкнутый ТЭЭЛ:

1 — железный сердечник; 2 — медная проволока; 3 — переключка из висмута; 4 — охлаждение.

из висмута, образуя таким образом короткозамкнутый термоэлектрический контур. При нагревании одного конца проволоки и охлаждении другого в цепи возникает ток, который превращает железный сердечник в сильный электромагнит. Такой короткозамкнутый ТЭЭЛ не имеет выхода на внешнюю омическую нагрузку. Ток создает магнитное поле, а энергия выделяется в цепи медь — висмут в виде тепла Джоуля.

Этот короткозамкнутый ТЭЭЛ при прочих равных условиях может создать приблизительно в четыре раза более мощное магнитное поле по сравнению с полем, получаемым при использовании для этой же цели обычного ТЭЭЛ. Действительно, в обычном

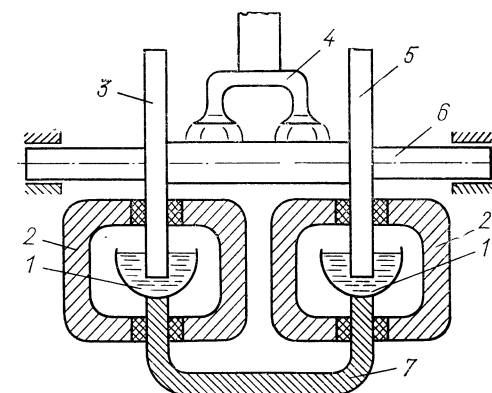


Рис. 3.8. Схема короткозамкнутого термоэлектрического мотора:

1 — ртутные контакты; 2 — магниты; 3 — полупроводниковый диск; 4 — газовые горелки; 5 — полупроводниковый диск; 6 — вал; 7 — шина короткого замыкания.

ТЭЭЛ общая электрическая мощность приблизительно в два раза меньше, чем в рассматриваемом короткозамкнутом ТЭЭЛ, и эта мощность используется приблизительно на 5%.

На рис. 3.8 приведена схема короткозамкнутого ТЭГ, используемого для вращения электромотора. В этом двигателе два диска из полупроводниковых материалов разной проводимости укреплены на оси таким образом, что образуют ротор. Центр каждого диска подогревается струей газового пламени до 250°C , а края дисков имеют температуру, близкую к окружающему воздуху. Оба диска соединены в короткозамкнутую электрическую цепь при помощи оси и двух ртутных контактов. В рабочем состоянии напряжение в цепи около 80 мВ, ток 3 А. Эта цепь находится в поле постоянного магнита, взаимодействие тока и поля вызывает вращение дисков (до 500 об/мин).

Данная схема термоэлектрического короткозамкнутого электромотора показывает возможность осуществления термоэлектрического цикла с прямым получением механической энергии.

§ 3.6

Термоэлектрический насос

Термоэлектрический генератор может быть использован в качестве источника питания электромагнитного насоса прямого действия для перекачки электропроводящих жидкостей, поскольку он позволяет получать большие токи низкого напряжения. Электромагнитные насосы производительностью 0,3—0,6 л/сек требуют ток около 1000 А при напряжении 1—2 В. Получение таких токов обычными способами связано с большими потерями, так как к. п. д. преобразования составляет 20—80%. Электромагнитные насосы применяются в ядерных реакторах с жидкометаллическим охлаждением. Например, термоэлектрический электромагнитный насос использован на установке для космических целей СНАП-10А с ядерным реактором и термоэлектрическим генератором для осуществления циркуляции теплоносителя (см. гл. 8).

Насос перекачивал натрий-калиевый сплав, получая ток от двух параллельных термоэлементов из теллурида свинца. Термоэлементы нагревались от жидкого металла, текущего через насос. Эффективный перепад температур обеспечивался отводом тепла (700 Вт) в окружающее пространство при помощи алюминиевых ребер, присоединенных к холодному спаю термоэлементов. Магнитное поле создавалось постоянным магнитом. Основные характеристики этого термоэлектрического электромагнитного насоса:

Сила тока, А	700
Отвод тепла на излучатель, Вт	700
Напряженность магнитного поля, Гс	2400
Повышение давления насосом, атм	0,095

Производительность насоса, л/сек	0,82
Эффективность насоса (мощность потока к расходуемому теплу), %	Около 1
Вес насоса, кг	9,1

Другой интересной возможностью является использование термоэлектрического жидкометаллического насоса для осуществления аварийной циркуляции натрия в контуре ядерного реактора. В случае прекращения подачи тока к насосам теплоносителя для работы термоэлектрического электромагнитного насоса можно использовать перепад температур между горячим и холодным контурами теплоносителя. Мощность аварийного насоса должна быть порядка десятых долей процента мощности основного насоса. Коэффициент полезного действия такого электромагнитного насоса невелик, однако в данном случае это не имеет решающего значения. Результаты расчета такого насоса, приведенные в работе [10], показывают, что при перепаде температур 100°C мощность насоса составит 1,2 Вт, а расход — 12 л/мин.

Как видно из указанных выше примеров, использование ТЭЭЛ для питания электромагнитного жидкометаллического насоса не вносит принципиальных изменений в цикл ТЭГ, однако позволяет существенно упростить конструкцию установки, улучшить ее герметичность и повысить надежность в эксплуатации.

§ 3.7

ТЭГ в сочетании с термоэлектрическим холодильником

Сочетание ТЭГ с термоэлектрическим источником холода рассмотрено И. Н. Помазановым, П. Л. Тихомировым [11] и другими авторами.

На рис. 3.9 показана принципиальная схема термоэлектрического охлаждающего устройства для случая, когда питание холодильника осуществляется непосредственно от ТЭГ. Устройство состоит из медных блоков с отверстиями, через которые циркулирует холодный и горячий теплоноситель, и полупроводниковых термоэлементов, зажатых между указанными теплопроводами. Одна группа ТЭЭЛ работает в режиме обычного ТЭГ, замкнутого на вторую группу ТЭЭЛ, которая при соответствующем охлаждении работает в режиме холодильника.

Этот способ совместного использования термоэлектрических эффектов может быть положен в основу охлаждающих устройств, действующих за счет дешевых низкотемпературных источников тепла (бросовых горячих вод, геотермальных источников, солнечной энергии и т. п.) [12].

В специальных случаях такие термоэлектрические устройства также могут иметь практическое значение. Так, одна американская

фирма разработала термоэлектрическую установку этого типа для кондиционирования воздуха, предназначенную для использования в подводных лодках [13]. Система работает совершенно бесшумно, поскольку не имеет вращающихся или поступательно движущихся деталей. В этом устройстве использованы полупроводниковые элементы из теллуристого висмута. Воздух охлаждался, проходя через теплообменники, расположенные на соответствующей стороне установки. Выделяющееся тепло отводилось окружающей морской во-

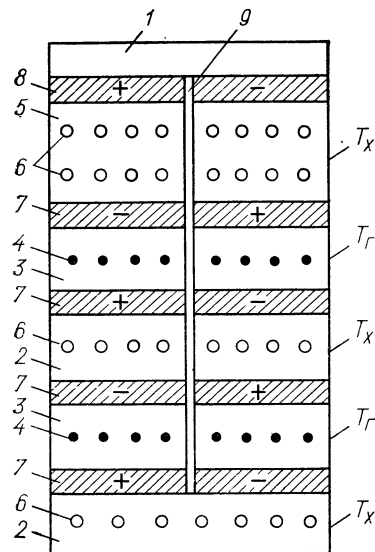


Рис. 3.9. Схема термоэлектрического холодильника с питанием от ТЭГ:

1 — медная пластинка холодильника; 2 и 5 — металлические пластины, охлаждаемые водой; 3 — металлические пластины, нагреваемые теплоносителем; 4 и 6 — каналы в металлических пластинах; 7 — пластины ТЭГ из дырочного и электронного полупроводников; 8 — пластины термохолодильника из дырочного и электронного полупроводников; 9 — изолирующий промежуток.

дой. Основные характеристики установки следующие: отводимое тепло — около 250 000 ккал/ч; количество охлаждаемого воздуха — около 100 м³/мин.

В СКБ Института полупроводников АН СССР разработана термоэлектрическая холодильная установка с использованием термоэлементов из $\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Sb}_2\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Bi}_2\text{Se}_3$. Установка работала при разности температур горячего и холодного спаев ТЭЭЛ 70—85°С и среднем значении добротности $Z = 2,5\text{—}2,6 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$.

Термоэлектрический кондиционер, разработанный для атомной подводной лодки (США), имел среднюю разность температур спаев 64°С, температуру холодных спаев —37°С (236°К) и добротность ТЭМ $2,3 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$.

Другой пример использования термоэлектрических систем — сочетание термоэлектрической батареи с установкой для опреснения соленой воды методом испарения [14]. В этом случае за счет переноса тепла Пельтье вторичная термоэлектрическая батарея (потребляющая ток первичной батареи или другого источника тока)

работает в режиме теплового насоса. Горячие спаи нагревают и испаряют соленую воду, на холодных спаих пар конденсируется, и отводится опресненная вода.

Сочетание ТЭГ с холодильным или опреснительным устройством не вносит изменений в термодинамику ТЭЭЛ, и эффективность такой установки зависит от обычных параметров. При наличии дешевого низкотемпературного тепла сочетание ТЭГ с холодильными устройствами может найти практическое применение.

§ 3.8.

ТЭГ в сочетании с фотоэлементами, термоэмиссионными диодами и паровым циклом

Один из путей повышения к. п. д. преобразования тепла в электроэнергию — сочетание термоэлектрического цикла с другими методами получения электроэнергии, например, фотоэлементами, термоэмиссионными диодами, паровым циклом и др. В этом случае можно использовать наиболее выгодные для каждого метода диапазоны температур.

Идея сочетания ТЭЭЛ с фотоэлементами (на солнечной энергии) была предложена и развита М. С. Соминским, рассмотревшим несколько вариантов таких устройств [15]. На рис. 3.10 показана принципиальная схема основного варианта. Солнечные лучи освещают фотоэлементы и нагревают горячие спаи термоэлементов до 200—250°С. Охлаждение холодных концов ТЭЭЛ производится рассеивающими радиаторами. Таким образом получается комбинированный генератор тока, который при заданной площади солнечного облучения вырабатывает электроэнергию больше, чем порознь фотоэлемент и термоэлемент.

Следует заметить, что нагрев пластин снижает к. п. д. фотоэлемента, так как практически большинство современных кремниевых фотобатарей могут успешно работать лишь до температур 120—150°С. Поэтому для эффективного использования подобных конструкций необходима разработка фотобатарей, способных работать при температурах до 250°С.

По сообщению Ю. Н. Малевского и др. [16], был испытан небольшой генератор с фотобатареей из четырех элементов (каждый сечением 10 × 10 мм) на основе арсенида галлия и с термоэlemen-

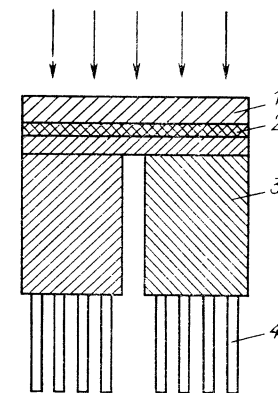


Рис. 3.10. Схема фото-термоэлектрогенератора:

1 — фотоэлемент; 2 — изоляционная прослойка; 3 — термоэлементы; 4 — радиаторы, рассеивающие тепло.

том из BiTeSb . Параболический концентратор солнечной энергии имел диаметр 950 мм. На фотоэлементе поддерживалась температура 150°C , на горячем спае ТЭЭЛ — около 120°C . Фотоэлемент и термогенератор генерировали в основном режиме примерно одинаковую мощность.

Другой возможный метод повышения к. п. д. установки — сочетание ТЭЭЛ с термоэмиссионными диодами. В этом случае диод работает, как обычно, при температурах $1500—2000^\circ\text{C}$. Теплоноситель, охлаждающий анод, нагревает горячие спаи термоэлементов до $400—600^\circ\text{C}$. Подобное устройство было разработано и испытано фирмой «Дженерал электрик», получен к. п. д. 5—6% при мощности 2 Вт, ТЭЭЛ изготовлялись из константана и SbZn [17].

Фирма «Вестингауз» испытала подобное же устройство в исследовательском ядерном реакторе. Диод помещался в центре, а термоэлементы располагались на периферии тепловыделяющего элемента. Обе системы работали последовательно и развивали мощность 1 Вт. Другими фирмами изготовлялись аналогичные генераторы большей мощности, например 15 Вт с к. п. д. 7,3%. В настоящее время установки, сочетающие ТЭГ с термоэмиссионным диодом, находятся в стадии лабораторных исследований и разработок.

Сочетание ТЭГ с паровым циклом мало изучено. Однако очевидно, что замена современной паротурбинной установки, имеющей более высокий к. п. д., чем ТЭГ, нецелесообразно как в отношении расхода топлива, так и из-за ввода в паросиловую установку новых специфических узлов ТЭГ.

В работе [18] указывается возможность применения термоэлектрического цикла в качестве верхней ступени к паровому циклу, т. е. использование для ТЭЭЛ температурного перепада $1200—600^\circ\text{C}$, а для парового цикла $600—30^\circ\text{C}$. В этом случае расход топлива на основной паровой цикл остается приблизительно неизменным, а дополнительная электроэнергия получается за счет ТЭГ, соответственно увеличивая общий к. п. д. энергетической установки. Однако получение высоких температур потребует более сложного и дорогостоящего оборудования. Поэтому в настоящее время сочетание термоэлектрического и парового циклов представляется реальным только в специальных случаях, позволяющих использовать конструктивные преимущества ТЭГ.

ГЛАВА 4

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

§ 4.1

Общая часть

В настоящее время известно большое количество материалов, обладающих термоэлектрическими свойствами. Однако для практического использования в термогенераторах могут быть пригодны термоэлектрические материалы, способные преобразовывать тепло в электричество с к. п. д. выше 0,1% при разности температур между горячим и холодным спаями термоэлементов порядка $200—300^\circ\text{C}$. Лучшие из современных термоэлектрических материалов позволяют получать к. п. д. до 10% при разности температур $500—600^\circ\text{C}$, а сочетание нескольких таких материалов (слоистые термоэлементы) дает возможность увеличить к. п. д. до 20% и более при разности температур $800—1000^\circ\text{C}$. На рис. 4.1 приведена зависимость к. п. д. от температуры горячего спая для некоторых материалов [1].

Коэффициент полезного действия термоэлектрического материала зависит в основном от его физических характеристик, таких, как ТЭДС, электропроводность и теплопроводность. Физические характеристики, как правило, являются функциями концентрации носителей и температуры. На рис. 4.2 показана качественная зависимость ТЭДС (α), электропроводности (σ) и теплопроводности (κ) от концентрации носителей для диэлектриков, полупроводников и металлов [2]. Электропроводность при переходе от диэлектриков к металлам возрастает, а ТЭДС, наоборот, убывает. Согласно теории оптимальная концентрация носителей соответствует оптимальной величине ТЭДС, которая приближенно может быть выражена как

$$\alpha_{\text{опт}} = 172 \left(1 + \frac{\kappa_{\text{эл}}}{\kappa_{\text{ф}}} \right) \text{ мкВ/град.}$$

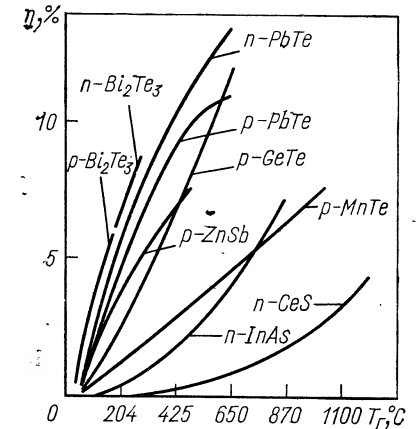


Рис. 4.1. Зависимость к. п. д. термоэлектрического материала от температуры горячего спая (температура холодного спая 27°C).

Для большинства наиболее эффективных термоэлектриков $\alpha_{\text{опт}}$ составляет 190—210 мкВ/град.

Теплопроводность непосредственно определяет количество тепла, не участвующее в процессе преобразования, т. е. представляет собой источник безвозвратных тепловых потерь. Теплопроводность содержит фононную (решеточную) $\kappa_{\text{ф}}$ и электронную $\kappa_{\text{эл}}$ составляющие, которые зависят от свойств кристаллической решетки. Как видно из рис. 4.2, значение электронной составляющей теплопроводности возрастает от диэлектриков к металлам. В металлах она прева-

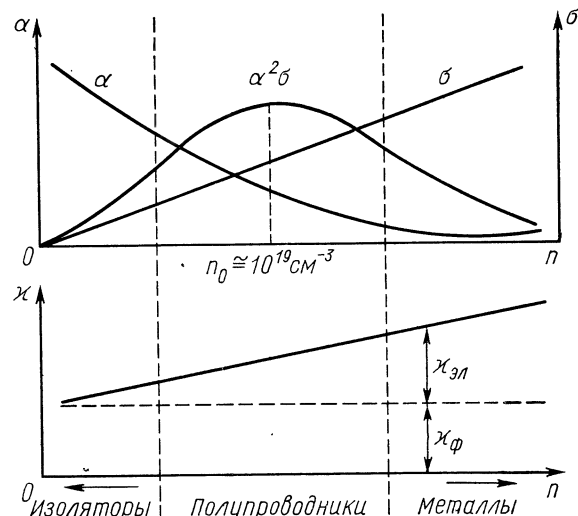


Рис. 4.2. Зависимость ТЭДС, электропроводности и теплопроводности от концентрации носителей.

лирует над решеточной составляющей и существенно понижает их добротность. Для получения максимальной добротности необходимо снизить до минимума величину теплопроводности материала. А. Ф. Иоффе предложил для снижения теплопроводности использовать системы твердых растворов и сплавов различных материалов. При образовании твердого раствора двух веществ (например, кремний — германий) в кристаллической решетке создаются дополнительные центры рассеяния для фононов и электронов. В результате этого фононная составляющая теплопроводности и подвижность электронов падают, но фононная составляющая падает быстрее подвижности, что приводит к возрастанию добротности материала. В случае невырожденных полупроводников снижение теплопроводности достигается путем введения в кристаллическую решетку нейтральных примесей, которые эффективно рассеивают фононы и практически не влияют на величину подвижности.

Параметр добротности термоэлектрического материала был введен А. Ф. Иоффе как наиболее универсальный и полный для оценки

экономичности всех видов термоэлектрических энергетических установок. Термоэлектрическая добротность материала определяется сочетанием указанных выше характеристик (ТЭДС, электропроводность и теплопроводность)

$$Z = \alpha^2 \sigma / \kappa.$$

Температурная зависимость добротности материалов *p*-типа показана на рис. 4.3, а материалов *n*-типа — на рис. 4.4 [3]. Как видно из рисунков, с ростом температуры добротность сначала возрастает, проходит через максимум, а затем падает. Для каждого материала

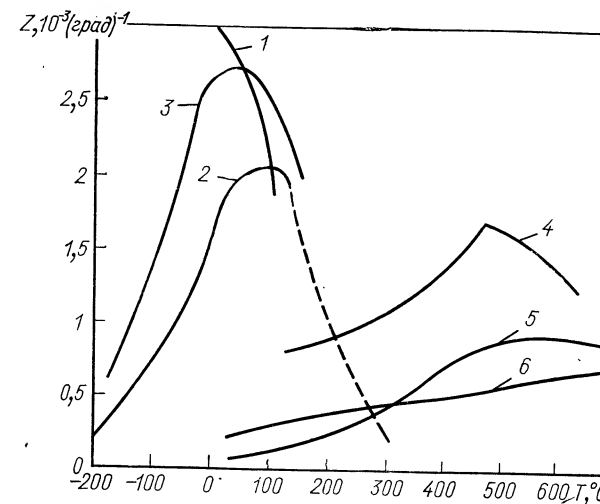


Рис. 4.3. Зависимость термоэлектрической добротности материалов *p*-типа от температуры:

1 — $\text{Bi}_2\text{SbTe}_3 + 0,56\% \text{ Se}$; 2 — $\text{Bi}_2\text{SbTe}_3 + 0,28\% \text{ Ag} + 0,5\% \text{ Se}$; 3 — $(\text{BiSb})_2\text{Te}_3$; 4 — $(\text{GeTe})_{0,95}(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_{0,050}$; 5 — GeTe ; 6 — $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$

имеется свой диапазон температур, в котором величина добротности достигает максимума. Добротность большинства термоэлектрических материалов при температуре выше 500° С лежит ниже $10^{-3} (\text{град})^{-1}$. Максимальное значение добротности $6 \cdot 10^{-3} (\text{град})^{-1}$ было получено для сплава BiSb при температуре 80° К.

Помимо указанных физических характеристик практическое использование термоэлектрического материала существенно зависит от ряда технологических критериев. Сюда относятся механические свойства материала и его способность выдерживать многократные нагревы и охлаждения. Важным условием является отсутствие в материале необратимых физико-химических реакций и превращений, которые чаще всего имеют место в области температур, близких к температуре плавления. Поэтому температура горячего спая термоэлемента выбирается существенно ниже температуры плавления материала. Термоэлектрические материалы, работающие в

области средних и высоких температур, должны иметь низкое давление паров и способность прочно удерживать легирующие добавки. В случае использования термоэлектрического преобразователя в сочетании с ядерным источником тепла (реактор, радиоактивный изотоп) термоэлектрический материал, находящийся в поле радиоактивных излучений, не должен существенно изменять своих характеристик в течение всего срока службы установки.

Работы по повышению эффективности термоэлектрических материалов ведутся в настоящее время в направлении усложнения твер-

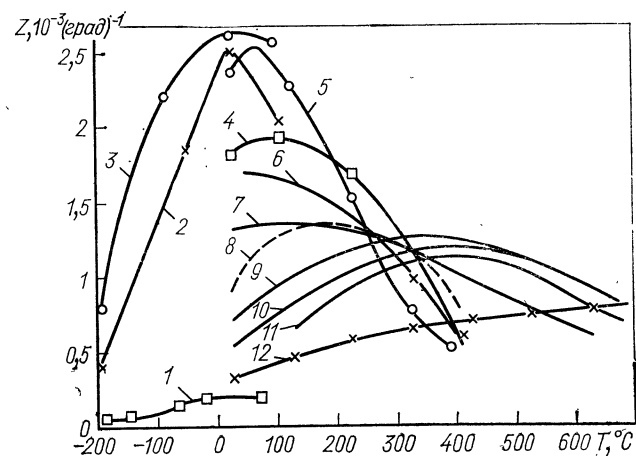


Рис. 4.4. Зависимость термоэлектрической добротности материалов n -типа от температуры:

1 — $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{Se}$; 2 — $\text{Bi}_2\text{Te}_3 + 0,08\% \text{ CuBr}$; 3 — $\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Bi}_2\text{Se}_3 + 0,5\% \text{ CuBr}$; 4 — $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{Se} + 0,05\% \text{ CuBr}$; 5 — $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,4}\text{Se}_{0,6} + 0,5\% \text{ CuBr}$; 6 — $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,4}\text{Se}_{0,6} + 10\% \text{ CuBr}$; 7 — $\text{PbTe} + 0,04\% \text{ Bi}$; 8 — $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{Se} + 0,1\% \text{ CuBr}$; 9 — $\text{PbTe} + 0,1\% \text{ Bi}$; 10 — $\text{PbTe} + 0,15\% \text{ Bi}$; 11 — $\text{PbTe} + 0,07\% \text{ Bi}$; 12 — $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$.

дых растворов на основе сплавов, содержащих три и более компонент. Глубокое легирование наиболее эффективных сплавов в некоторых случаях дает возможность расширить интервал их рабочих температур. Кроме того, ведутся поиски новых материалов с высокими термоэлектрическими характеристиками.

§ 4.2

Твердые термоэлектрические материалы

Полупроводниковые соединения характеризуются определенной структурой и химическими связями. Поэтому каждому типу термоэлектрического материала соответствует определенный интервал рабочих температур. Исходя из этого термоэлектрические

материалы принято классифицировать как *низкотемпературные*, *среднетемпературные* и *высокотемпературные*.

Низкотемпературный интервал обычно определяется областью 100—600° К. Вещества, обладающие высокой термоэлектрической эффективностью в этом температурном интервале, используются как для получения электроэнергии, так и для термоэлектрического охлаждения. Условия работы термоэлектрических материалов в этом интервале температур сравнительно благоприятны, поскольку процесс окисления, диффузии в местах контактов, а также улетучивания примесей и основного вещества идут очень медленно. В качестве низкотемпературных материалов наиболее широкое распространение получили вещества, исходные компоненты которых — висмут, сурьма, селен и теллур.

В последнее десятилетие очень интенсивно исследуются среднетемпературные термоэлектрические материалы (рабочий интервал 600—1000° К), хотя с точки зрения термодинамики среднетемпературный интервал менее выгоден, чем низкотемпературный (ZT для среднетемпературного интервала в 1,5—2 раза ниже, чем для низкотемпературного). Использование каскадных элементов обеспечивает довольно высокие значения к. п. д. и этим привлекательно для термоэлектрической энергетики. В настоящее время основными материалами, используемыми в этом интервале температур, являются теллуристый свинец PbTe , селенистый свинец PbSe , теллуристый германий GeTe , соединение AgSbTe_2 и твердые растворы на основе этих соединений. Нижняя граница высокотемпературного интервала лежит в области 950—1000° К. Верхняя граница до настоящего времени достаточно точно не определена, хотя уже созданы термоэлектрические материалы, пригодные для использования при температуре до 2000° К. По-видимому, это объясняется тем, что в области температур выше 1600° К более эффективны термоэмиссионный и магнитогидродинамический циклы преобразования. Высокие температуры ставят термоэлектрические материалы в очень жесткие условия; окисляемость, летучесть примесей, давление паров, диффузия и пределы растворимости легирующих добавок играют здесь важную, а иногда решающую роль. Наиболее надежно исследованным и испытанным в реальных конструкциях материалом для интервала температур 900—1500° К является система кремний — германий с непрерывным рядом твердых растворов, имеющих температуру плавления от 1230 (Ge) до 1693° К (Si).

В табл. 4.1 приведены основные характеристики некоторых термоэлектрических материалов. Материалы расположены в порядке возрастания температуры плавления. Приведенные в таблице данные по термоэлектрическим характеристикам являются ориентировочными, поскольку указанные характеристики существенно зависят от состава и технологии изготовления термоэлектриков и от других факторов. В графе 5 (считать слева направо) дана температура или диапазон температур, при которых измерялись термоэлектрические характеристики (для диапазона температур даны средние значения

Характеристики термоэлектрических материалов

Материал, легирующие добавки	Тип проводимости	Точка плавления, °C	Плотность, г/см ³	Температура, °C	α , 10 ⁶ в/град	ρ , 10 ⁸ ом·см	κ , 10 ³ вт/(см·K·град)	Z , 10 ³ (град) ⁻¹	Литература
C ₂₀ H ₄ N ₈ Cu		>100	—	45÷100	4,5	—	—	—	[5]
Bi	<i>n</i>	280	9,8	27	80	—	335 (ф)	0,8	[7]
BiSb (12%)	<i>n</i>	310	9,5	27 —193	— —	— —	24,2 (ф) —	— 6,0	[7] [30]
BiSb (91%) + Sb (9%)	<i>n</i>	310	9,5	20—200		200	44	—	[6]
Bi (86,7%) + Sb (8,6%) [α измерено в паре с BiSb (91%) + Sb (9%)]	<i>p</i>	310	9,5	20—100 20—200	132 132	235 240	47 54	— —	[6] [6]
Te		450	5,8	20	400	700 000	580		[15]
SbZn, стехиометрический состав, легированный Cu Sn	<i>p</i>	566	6,8	27 90 427	— 200 200	— 2900 2860	27,2 (ф) 20 20	0,68 0,7 0,7	[7] [8] [9]
Sb (65%) + Zn (35%), легированный Ag (0,1%), Sn (1%), Bi (6%)	<i>p</i>	546	6,8	20—100 20—200	250 270	2700 3100	16,5 15,2	— —	[6] [6]
SbZn (90%) + CdSn (10%), легированный Sn	<i>p</i>	—	—	—	200	3300	14,0	0,85	[14]
AgSbTe ₂ , стехиометрический состав	<i>p</i>	567	7,1	27 227—477 427	— — 200	— — 2000	7,1 (ф) — 6,3	— 1,3 1,6	[7] [7] [9]
AgTe (42%) + Sb ₂ Te ₃ (58%)	<i>p</i>	—	7,16	27—473	—	—	8,2	1,38	[13]
AgSbTe ₂ (90%) + GeTe (10%)	<i>p</i>	—	—	27 277—527	— —	— —	15 (ф) —	— 1,3	7 7
Bi ₂ Te ₃ , стехиометрический состав, легированный CuI, AgI	<i>n</i>	585	7,9	27 20 —23÷257	— 170 —	— 1000 —	14,2 (ф) 18 —	2,4—2,6 2,0 1,7	[7] [8] [7]
Bi ₂ Te ₃ , стехиометрический состав, легированный Bi, Pb	<i>p</i>	585	7,9	27 —23÷257	— —	— —	14,2 (ф) —	2,1—2,4 1,5	[7]
Bi ₂ Te ₃ (для теплового потока 1400—9000 вт/м ²)	—	—	—	0—50 50—100 100—150 150—200 200—250 250—300	— — — — — —	— — — — — —	10,0 11,0 11,0 10,0 10,0 11,0	2,1 2,0 1,75 1,5 1,3 1,0	[4]
Bi ₂ Te ₃ (85%) + Bi ₂ Se ₃ (15%)	<i>n</i>	—	7,5	277 27—277 20	170 170	1000 1000	12 21 12	3,0 2,04 3,0	[9] [13] [8]
Bi ₂ Te ₃ (75%) + Bi ₂ Se ₃ (20%), легированный CuBr, AgI	<i>n</i>	620	7,6	57 —27÷297	— —	— —	— —	2,4—2,7 1,8	[7] [7]
Bi ₂ Te ₃ (80%) + Bi ₂ Se ₃ (25%), легированный CuBr	<i>n</i>	620	7,6	27 25—300	125 —	560 —	9,1 (ф) —	— 1,2	[10] [10]

Материал, легирующие добавки	Тип прово- димости	Точка плавления, °C	Плот- ность, г/см ³	Температура, °C	α , 10 ⁶ в/град	ρ , 10 ⁶ ом·см	κ , 10 ³ вт/(см× ×град)	Z , 10 ³ (град) ⁻¹	Литера- тура
Bi ₂ Te ₃ (75%) + Bi ₂ Se ₃ (25%) легированный CuBr, AgI	<i>n</i>	620	—	27 25—300	166 150	1030 600	13,3 (ф) 20	— 1,9	[10] [10]
Bi ₂ Te ₃ Se	<i>n</i>	—	7,5	25	—	—	—	2,3	[12]
Bi ₂ Se ₃ , стехиометрический состав	<i>n</i>	712	5,6	20	200	2000	14	0,8	[8]
Bi ₂ Te ₃ (80%) + Sb ₂ Te ₃ (20%)	<i>p</i>	—	—	20 400	160 160	670 670	14 14,5	2,8 2,04	[8] [9]
Bi ₂ Te ₃ (74%) + Sb ₂ Te ₃ (26%), легированный Ag, PbCl ₂	<i>p</i>	620	6,7	27 —27÷297	— —	— —	9,2 (ф) —	3—3,4 2,1	[7] [7]
Bi ₂ Te ₃ (50%) + Sb ₂ Te ₃ (40%) + +Bi (10%)	<i>p</i>	—	—	300	155	800	15	—	[10]
Bi ₂ Te ₃ (30%) + Sb ₂ Te ₃ (70%), леги- рованный I (0,1%)	<i>p</i>	—	—	20	195	1000	6	1,5	[11]
Bi ₂ Te ₃ (30%) + Sb ₂ Te ₃ (70%), леги- рованный Te (2%)	<i>p</i>	—	—	27 25—300	210 —	980 —	12,7 —	— 2,5	[10, 11]
Bi ₂ Te ₃ (25%) + Sb ₂ Te ₃ (75%), леги- рованный Se (1,75%)	<i>p</i>	—	—	20	196	780	14,9	—	[10]
Bi ₂ Te ₃ (20%) + Sb ₂ Te ₃ (80%) + Te (6%)	<i>p</i>	—	—	27 25—300	174 —	650 —	16,4 —	— 2,1	[10] [10]
Bi ₂ Te ₃ (20%) + Sb ₂ Te ₃ (80%)	<i>p</i>	—	6,8	27—400	—	—	14	2,04	[13]
Sb ₄ AuBiTe _{7,5}	<i>p</i>	—	7,2	27—297	—	—	17,8	1,6	[9]
BiSb ₄ Te _{7,5}	<i>p</i>	—	6,8	25	—	—	—	3,3	[12]
Sb ₂ Te ₃ , стехиометрический состав	<i>p</i>	612	6,5	27 20	— 100	— 330	13 (ф) 32	0,81 0,9	[7] [8]
Sb	<i>p</i>	630	6,6	200	50	—	—	0,1	[8]
AsSe (40%) + As ₂ Te ₃ (60%)	—	—	—	—	1400	—	—	—	[27]
GeTe, стехиометрический состав, ле- гированный Te (2,5%)	<i>p</i>	725	6,2	27—577	—	—	26,8 (ф)	0,9	[7]
GeTe (90%) + AgSbTe ₂ (10%)	<i>p</i>	—	—	250—500	—	—	—	1,3	[10]
GeTe (95%) + Bi ₂ Te ₃ (5%)	<i>p</i>	712	6,3	327—627 647	— —	— —	— 20	1,4 1,7	[7] [9]
GeTe + Bi	<i>p</i>	—	5,5	27—647	—	—	20	1,1	[13]
Pb (62,8%) + Te (37,2%)	<i>n</i>	—	—	20	140	715	8,5	0,77	[11]
PbTe, стехиометрический состав, ле- гированный Br, Pb	<i>n</i>	922	8,16	20 277—627	160 —	670 —	28	1,5 1,3	[8] [7]
PbTe, легированный PbI ₂ (0,03%)	<i>n</i>	—	8,15	27—600	125	500	17	1,42	[9]

Материал, легирующие добавки	Тип проводимости	Точка плавления, °C	Плотность, г/см³	Температура, °C	α , 10⁻⁵ в/град	ρ , 10⁻⁵ ом·см	κ , 10³ вт/(см·К·град)	Z , 10³ (град)⁻¹	Литература
PbTe	<i>n</i>	904	8,15	100—150 150—200 200—250 250—300 300—350 350—400 400—450 450—500	— — — — — — — —	— — — — — — — —	25 21 17 15 13 12 11 12	0,8 1,0 1,1 1,3 1,4 1,5 1,5 1,3	[4]
PbTe, стехиометрический состав, легированный Ag, K, Na	<i>p</i>	922	8,16	277—627	—	—	—	1,2	[7]
PbTe, легированный Na (3%)	<i>p</i>	—	8,15	27—600	125	357	18÷20	1,16	[13]
PbTe (75%) + SnTe (25%), легированный PbCl₂ + Pb	<i>n</i>	910	7,9	327—727 527	— —	— —	— —	1,15 1,35	[7] [7]
PbTe + SnTe	<i>p</i>	—	6,7	27—600	—	—	14,5	0,9	[13]
PbSe, стехиометрический состав, легированный PbCl₂ + Pb	<i>n</i>	1088	8,1	20 277—677	160 —	910 —	24 —	1,35 1,05	[7] [8]
PbS стехиометрический состав, легированный Cl	<i>n</i>	1114	5,9	20 277—727	160 —	1670 —	22 —	0,9 0,7	[8] [7]
PbS, легированный Pb	<i>n</i>	—	—	—	198	1700	20	1,2	[14]
PbS, легированный In (1%)	<i>n</i>	—	7,5	27—293	—	—	17	0,8	[13]

U	—	1130	18,7	100 200—800	14 19÷39,5	39,5 45÷53	270 290÷423	— —	[20]
Cu₂S	—	1126	—	1200	300	—	14000	—	[17]
MnTe, легированный Na (1%)	<i>p</i>	1170	—	427—1027	—	—	—	0,35	[7]
CuTeS	—	1460	—	—	—	—	—	1,1	[17]
CuO₂ (измерено в паре с Cu)	<i>p</i>	1232	6,1	20	1000	—	—	—	[18]
PbTe + PbSe	<i>n</i>	—	—	20	160	1100	12	1,8	[8]
Li₀,₀₄ Mn₀,₉₆ Te₀,₉₅ Se₀,₀₅	<i>p</i>	—	6,06	27—1027	—	—	16	0,39	[9]
Cu (99,99%)	—	1083	8,9	20 100 300 500 800	3,1 5,6 10,5 15,4 22,8	1,6 2,2 3,6 5,1 7,4	3900 3800 3700 3600 3400	— — — — —	[16]
MnSi	<i>p</i>	1275	—	20	102	260	42	0,96	[19]
MnSi₂	<i>p</i>	—	—	20 1000	160 175	460 14300	63 22	0,79 —	[19] [9]
Константан	<i>n</i>	1260	8,9	400 27—1000	43 —	49 —	372 477	— 0,086	[21] [21]
Si (70%) + Ge (30%), легированный GaB	<i>p</i>	1330	3,25	677—1077	—	—	54(ф)	0,55	[7]

Материал, легирующие добавки	Тип проводимости	Точка плавления, °C	Плотность, г/см ³	Температура, °C	α , 10 ⁶ в/град	ρ , 10 ⁶ ом·см	κ , 10 ³ вт/(см××град)	Z , 10 ⁴ (град) ⁻¹	Литература
Si (68%) + Ge (32%)	p	—	3,3	27—1000	—	—	60	0,24	[13]
SiGe	—	—	—	150—200 250—300 300—350 350—400 400—450 450—500 500—550 550—600	— — — — — — — —	— — — — — — — —	53 51 50 49 48 47 46 45	0,30 0,42 0,48 0,52 0,55 0,58 0,59 0,60	[4]
Si (80%) + Ge (20%), легированный P, As	n	1370	2,95	657—1077	—	—	67(ф)	0,7	[7]
Si (68%) + Ge (32%), легированный GaB	n	—	3,3	27—1000	—	—	60	0,43	[13]
Si (70%) + Ge (30%)	—	1225	3,3	775	—	—	—	0,7	[12]
Si _{1,88} , Ge	n	—	5,3	1127	—	—	11	0,19	[9]
Сплав MCC-40, легированный CaO (0,5%), B (0,25%)	p	1050	3,6	800	—	—	—	0,4	[22]
Сплав MCC-50, легированный CaO (1%)	p	2100	2,2	1200	—	—	—	0,8—1,0	[22]
Сплав MCC-40, легированный ThO ₂ (0,5%), As (2%)	n	1030	3,7	700	—	—	—	0,8	[22]
Сплав MCC-60, легированный CaO (1%), ThSi ₂ , CoSi	n	2500	2,7	1200	—	—	—	0,2	[22]
InAs, легированный P (5%)	n	—	—	427—927	—	—	—	0,55	[1]
InAs _{0,9} P _{0,1}	n	—	5,58	27—867	—	—	70	0,4	[13]
Хромель	p	1435	8,7	400 800 1000	— — —	72,5 79,8 83,5	235 — —	—	[15] [15] [15]
CoSi	n	1415	—	20	46	280	130	0,05	[19]
Ni	n	1452	8,9	20 300 800	13,3 16,6 18,0	6,5 24 44	920 680 570	— — —	[16]
Fe	p	1530	7,8	27 300 800	12,3 14,5 14,8	13,2 35 108	770 560 405	— — —	[15]
CrSi ₂	p	1550—1750	4,4	20	120	910	63	0,25	—
Te ₂ O ₃	n	—	5,2	1300	228	71 000	20	—	[9]
Fe ₂ O ₃	n	1565	5,2	600	380	8·10 ⁴	20	—	[23]
Fe ₂ Si ₂	n	—	—	650	—	—	—	0,2	[12]
ReSi ₂	p	1930	—	20	150	—	—	0,63	[19]

Материал, легирующие добавки	Тип проводимости	Точка плавления, °C	Плотность, г/см ³	Температура, °C	α , 10 ⁶ в/град	ρ , 10 ⁶ ом·см	κ , 10 ³ вт/(см×град)	Z , 10 ⁴ (град) ⁻¹	Литература
NiO	p	1960—2500	6,3	600 1300	200 120	19000 16000	— 50	—	[23] [9]
Cr ₂ O ₃	—	1990	5,0	377—1127	450	15·10 ⁶	100	0,00013	[24]
Cr ₂ O ₃ + NiO (1%)	—	1990	5,0	377—1127	300	1,7·10 ⁶	100	0,0005	[24]
CeS _{1,33}	n	2000	—	927—1227	—	—	10 (ф)	0,3	[7]
CeS	n	—	5,27	925 27—1127	—	—	11	0,4 0,19	[12] [13]
MoSi ₂	n	2100	—	20	22	22	310	0,07	[13]
Ce _{2,72} Se ₄	n	—	—	25	—	800	240	—	[25]
Ce _{2,5} Ba _{0,5} Se ₄	n	—	—	25 1027	35 140	800 1700	24 26	—	[25]
Ce _{2,5} Sr _{0,5} Te ₄	n	—	—	25 1027	40 210	1100 4000	20 15	— —	[25]
Na _{2,76} Te ₄	n	—	—	25 1027	40 240	1400 7500	14 9	—	[28]

* SiC (α измерено в паре с C)

	—	2400 — —	3,2	27 600 1000	— 300 300	15·10 ⁶ 8·10 ⁶ 5,7·10 ⁶	360 175 135	— — —	[15]
MoSi ₂	—	—	—	1500	20	21	470	0,04	[15]
PuO ₂	—	2500	11	500	500	10 ¹⁰	30	—	[15]
Mo	—	2620	10,2	27÷1227	30,8	20	1350	0,035	[24]
US	p	2700	10,8	25 500 1000	50 56,6 43,5	286 325 328	97,5 125 149	0,089 0,079 0,04	[11]
Li (70%) + C (30%)	—	2700	3,2	20 500	— —	10 ⁸ 10 ⁷	300 100	— —	[26]
UO ₂	—	2800	10,9	27 1000	— —	2,5·10 ¹³ 10 ⁷	69 59	— —	[15]
NbB ₂	p	3000	—	20	12	60	200	0,12	[29]
W (99,92%)	—	3360	19,3	27—1227 2127	31,5 7,36	24 70	1350 970	0,031 —	[24]

этих характеристик). Значения α для термоэлектрического материала измерены в паре с платиной, если нет специального указания в графе 1. Индекс «ф» в графе 8 означает фоновую составляющую теплопроводности. Более подробное описание свойств термоэлектрических материалов приведено в работах [4—30].

§ 4.3.

Некоторые вопросы изготовления твердых термоэлектриков

Твердые термоэлектрические материалы изготавливаются в основном методом сплавления и порошковой металлургии. Порошковая металлургия, как более простой и дешевый метод, за последнее время получает все более широкое распространение.

Обычно в порошковой металлургии исходные материалы в виде порошков с размером зерна от 1 до 100 мкм прессуются как в холодном (комнатная температура), так и в горячем (температура выше 400°С) состояниях. Холодное прессование ведется под давлением 4—10 Т/см², давление при горячем прессовании зависит от материала пресс-форм. В случае графитовых пресс-форм используется давление до 300 кг/см², а в стальных пресс-формах прессование проводится под давлением до 4 Т/см². Материал, полученный горячим прессованием, имеет плотность, близкую к теоретической. Горячее прессование, например, используется для изготовления слоистых термоэлементов из таких материалов, для которых технология сплавления очень сложна.

Спрессованные при комнатной температуре материалы подвергают термообработке (спеканию) при температуре ниже точки плавления. В результате происходит упрочнение материала и улучшение проводимости вследствие диффузионных процессов. В процессе последующего холодного или горячего прессования спеченные материалы еще более уплотняются. Для улучшения термоэлектрических свойств после прессования можно проводить специальную термообработку в атмосфере водорода или в вакууме.

Следует иметь в виду, что свойства некоторых термоэлектрических материалов подчиняются обычным закономерностям. Например, при спекании спрессованной смеси порошков висмута и теллура стехиометрического состава наблюдается уменьшение плотности (распухание) спекаемого материала при температуре спекания около 400°С и давлении выше 2 Т/см². Увеличение продолжительности спекания до 100 ч улучшает термоэлектрические свойства главным образом из-за роста проводимости. Термоэлементы, изготовленные методом порошковой металлургии, не требуют дополнительной механической обработки, что позволяет практически полностью использовать исходный материал. Спрессованные и спеченные образцы более однородны и обладают лучшей стабильностью свойств, чем литые. При массовом производстве термоэлементов метод порошковой металлургии дешевле других методов.

Ниже приведен пример изготовления методом порошковой металлургии термоэлемента, содержащего 80 вес. % Bi₂Te₃ — 20 вес. % Bi₂Se₃ с добавкой 0,06 вес. % CuBr (*n*-ветвь) и 70 вес. % Sb₂Te₃ — 30 вес. % Bi₂Te₃ с добавкой 0,15 вес. % Pb (*p*-ветвь) [30]. Исходные материалы размельчаются в порошок, который прессуется при давлении 4 Т/см². Далее материал *n*-ветви спекается в атмосфере чистого водорода при температуре 370°С в течение 5 ч, а материал *p*-ветви спекается при 380°С в течение 2 ч. Экспериментальные образцы, изготовленные по этой технологии, имели характеристики, приведенные в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Характеристики термоэлектрических материалов				
Материал	α , мкВ/град	σ , (ом·см) ⁻¹	κ , вт/(см·град)	Z , (град) ⁻¹
<i>n</i> -типа	—175	950	$1,17 \cdot 10^{-2}$	$2,45 \cdot 10^{-3}$
<i>p</i> -типа	+175	1240	$1,14 \cdot 10^{-2}$	$2,65 \cdot 10^{-3}$

Следует отметить, что термоэлектрические свойства материалов, изготовленных методом порошковой металлургии, зависят не только от состава исходных компонент, условий спекания и термообработки, но и от размеров образца. Например, результаты исследования термоэлектрических свойств образцов из Sb₂Te₃—Bi₂Te₃ и Bi₂Te₃—Bi₂Se₃, изложенные в работе [30], показали, что у материала *n*-типа добротность снижается на 17% при изменении размеров образца от 80 × 10 × 10 мм до 3 × 3 × 5 мм.

В последнее время начаты поиски новых методов изготовления полупроводниковых материалов. Эти исследования ведутся в основном применительно к созданию солнечных элементов, но полученные результаты могут быть использованы в будущем и для изготовления термоэлектрических материалов. Один из таких методов, основанный на бомбардировке ионами кадмия тонких пленок теллура, описан в работе А. Е. Городецкого и др. [31]. На стекло напылялась пленка теллура толщиной 0,1 мкм, которая затем облучалась ионами кадмия с энергией 5—50 кэВ. Изготовленные таким образом пленки имели дырочную проводимость с подвижностью 3—5 см²/(в·сек). Аналогичную характеристику имеет теллур кадмия с избытком теллура (*p*-типа), изготовленный по обычной технологии.

В других опытах [32] пластинка кремния облучалась пучком ионов бора, ускоренных до энергии 1 МэВ. При этом проникновение ионов бора в кремний достигало 1,4 мкм. Преимущество этой технологии состоит в том, что максимальная температура процесса не превышает 800°С (обычные процессы диффузии идут при температуре выше 1000°С) и существенно снижается количество примесей, попадающих в кремний в процессе легирования, так как облучение производится только ионами материала-добавки.

Фирмой «Монсанто кемикл компани» [22] исследовалась возможность получения термоэлементов путем напыления сплава МСС в пламени или дуговом разряде. На графитовый цилиндр последовательно напылялись слои молибдена, сплава МСС-50 и опять молибдена.

Исследование различных образцов при температуре горячего спая около 1190°C и перепаде $250\text{—}300^{\circ}\text{C}$ показало, что ТЭДС лежит в пределах $130\text{—}300\text{ мкВ/град}$, т. е. лучшие образцы имеют такую же ТЭДС, как и образцы, изготовленные по стандартной технологии.

В заключение приведем данные о стоимости изготовления некоторых наиболее употребляемых термоэлектрических материалов (табл. 4.3). Следует отметить, что стоимость изготовления существенно зависит от совершенства технологии, масштаба производства, специфических требований и других условий, поэтому приведенные в табл. 4.3 данные ориентировочны. Как видно из табл. 4.3, к наиболее дорогостоящим материалам относятся арсенид индия и кремний-германиевые сплавы, а к наиболее дешевым — сернистый свинец, теллуристый свинец, константан и сурьмянистый цинк.

Таблица 4.3

Стоимость термоэлектрических материалов

Материал	Тип проводимости	Плотность, г/см ³	Стоимость, долл/г
PbTe + 0,3 ат. % Na	p	8,15	0,013
PbTe + 0,03 мол. % PbI ₂	n	8,15	0,013
PbTe—SnTe	p	6,7	0,017
PbS—0,1 ат. % In	n	7,5	0,0007
Sb ₂ Te ₃ (80 мол. %) + Bi ₂ Te ₃ (20 мол. %)	p	6,8	0,023
Sb ₂ Te ₃ (58%)—AgTe (42%)	p	7,16	0,030
Sb ₄ BiAuTe _{7,5}	p	7,2	0,152
Bi ₂ Te ₃ (85 вес. %) + Bi ₂ Se ₃ (15 вес. %)	n	7,5	0,020
ZnSb	p	6,4	0,007
GeTe (95%)—Bi ₂ Te ₃ (5%)	p	5,5	0,118
Si (68%)—Ge (32%)	p	3,3	0,214
Si (68 мол. %) — Ge (32 мол. %)	n	3,3	0,214
CeS	n	5,27	1,34
InAs _{0,9} P _{0,1}	n	5,58	0,585
Константан	n	8,4	0,0013
Li _{0,04} Mn _{0,96} Te _{0,95} Sb _{0,05}	p	6,06	0,023

§ 4.4

Жидкие термоэлектрические материалы

Изучение жидких термоэлектриков началось сравнительно недавно. Первое обстоятельное исследование физико-химических свойств полупроводников в жидком состоянии выполнено А. Р. Регелем с сотрудниками в 1954—1956 гг. [33]. Результаты этих работ пока-

зали, что применение жидких термоэлектриков имеет большие потенциальные возможности получения высоких значений добротности. В других исследованиях было обнаружено, что у некоторых материалов (Cu₂O, AgSbTe₂) при переходе в жидкое состояние добротность возрастает. Электропроводность теллурида висмута в жидком состоянии увеличивается в три раза, что соответственно приводит к росту теплопроводности, обусловленному подвижностью носителей тока. У соединений типа Sb₂Te₃ при переходе через точку плавления наблюдается линейный рост теплопроводности с температурой. На рис. 4.5, а и б показано изменение теплопроводности в интервале температур $400\text{—}1500^{\circ}\text{K}$, полученное В. И. Федоровым и Л. С. Сильбансом, для некоторых термоэлектриков в твердом и жидком состоянии [34]. В. И. Федоров, А. С. Охотин и др. [35] исследовали термоэлектрические характеристики Bi₂Se₃ в жидкой фазе. Результаты этих исследований приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Характеристики Bi₂Se₃ в жидкой фазе

T, °C	α , мкВ/град	σ , ом ⁻¹ ·см ⁻¹	$\kappa \times 10^2$ Вт/(см·град)
750	—31	980	12
800	—22	1080	14
850	—14	1190	17
900	—6	1300	19
950	+3	1400	22
1000	+11	1500	24
1050	+20	1610	27
1100	+28	1720	29
1150	+36	1820	32
1200	+45	1920	34

В работе [36] исследовались термоэлектрические характеристики сплава TlTe с содержанием Tl от 31 до 68%. Температура плавления эвтектик с содержанием 31% Tl равна 200, а с содержанием 68% Tl — 400°C . На основании результатов этой работы вычислены значения ТЭДС для интервала температур $500\text{—}1000^{\circ}\text{K}$, приведенные на рис. 4.6. Как видно из этих данных, жидкие полупроводники имеют вполне приемлемые значения ТЭДС.

Б. И. Казанджан, М. П. Вукалович и др. [37] показали, что при переходе из твердого состояния в жидкое электропроводность материала Sb₂Se₃ не претерпевает скачка и ее зависимость от температуры имеет полупроводниковый характер. При этом было обнаружено, что введение добавок сурьмы и теллура повышает ТЭДС и электропроводность.

В работе [38] измерялись ТЭДС и сопротивление Cu₂S в диапазоне температур $400\text{—}1200^{\circ}\text{C}$. С увеличением температуры от 400°C до точки плавления Cu₂S (1126°C) ТЭДС оставалась почти постоянной.

ной (300 ± 50 мкВ/град), при температуре плавления ТЭДС возросла до 450 мкВ/град, а затем упала до 300 мкВ/град при 1200°С. Сопротивление в интервале температур 400—1126°С возросло от $0,9$ до $1,6 \cdot 10^{-2}$ ом·см и затем упало в жидкости до $1,4 \cdot 10^{-2}$ ом·см при 1200°С.

Рассмотренные примеры показывают, что жидкие термоэлектрические материалы, находящиеся в настоящее время в стадии лабора-

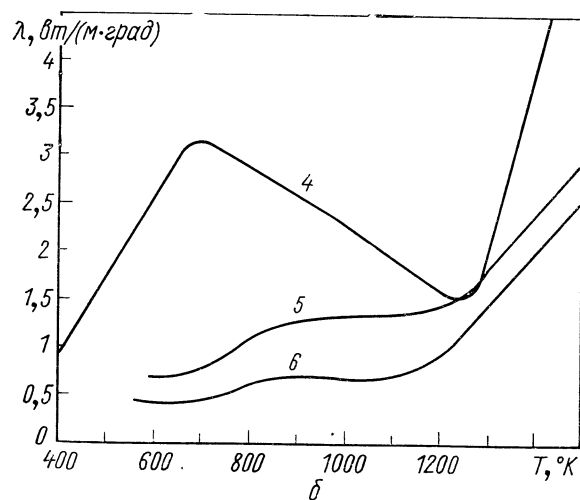
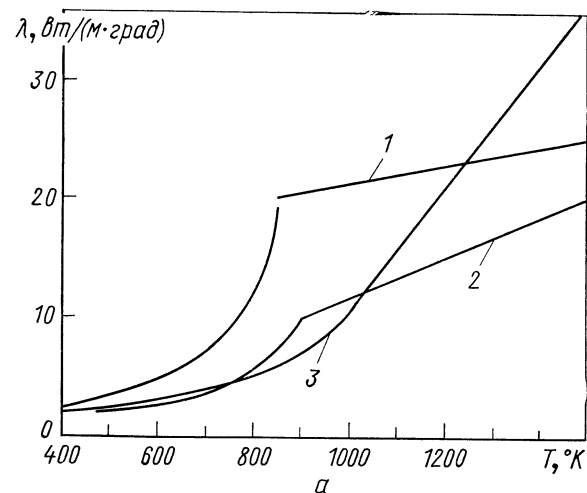


Рис. 4.5. Зависимость теплопроводности некоторых твердых и жидких полупроводников от температуры:

1 — Bi_2Te_3 ; 2 — Sb_2Te_3 ; 3 — Bi_2Se_3 (а); 4 — $\text{Cu}_2\text{Te}_{0,875}\text{S}_{0,125}$; 5 — $\text{Cu}_2\text{Te}_{0,8}\text{S}_{0,5}$; 6 — $\text{Cu}_2\text{Te}_{0,75}\text{S}_{0,25}$ (б).

торных исследований, могут в будущем иметь большое практическое значение, так как позволяют значительно увеличить рабочие температуры термоэлектрического цикла. При этом упрощается решение проблемы коммутационных контактов и растрескивания из-за термических напряжений. Вместе с этим возникают новые проблемы, связанные с коррозией, испарением и другими особенностями жидких полупроводников.

В последние годы жидкие термоэлектрические материалы рассматриваются с точки зрения использования их для других целей.

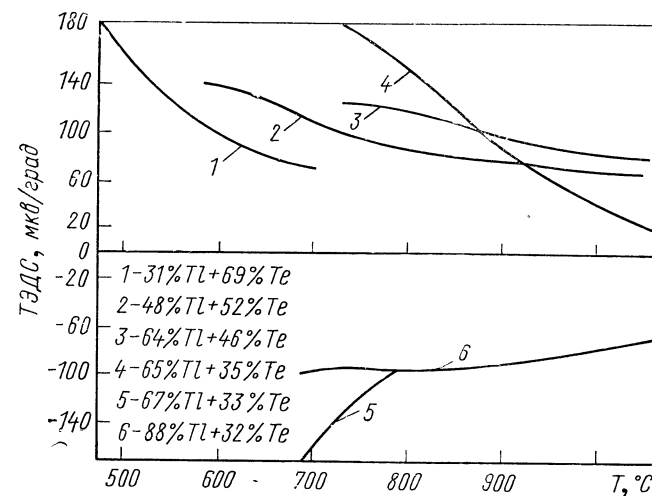


Рис. 4.6. Зависимость ТЭДС TlTe от температуры.

Например, исследовалась возможность применения жидких полупроводников в качестве термометров сопротивления для ядерных реакторов. Такие устройства невелики по размерам и мало подвержены действию излучения.

Исследования халькогенидов мышьяка типа $(\text{As}_2\text{Se}_3)_4\text{Ge}$ в ампулах диаметром 3,2 мм из алюмосиликатного стекла марки А42 без примесей бора показали, что при изменении температуры от 350 до 650°С ТЭДС возрастает от 200 до 1200 мкВ/град, а проводимость изменяется в 1000 раз [39]. Такой материал вполне пригоден для измерения температуры в ядерных реакторах.

§ 4.5

Действие ядерных излучений на термоэлектрические материалы

Использование ядерных источников тепла в сочетании с термогенератором налагает на термоэлектрический материал некоторые условия, определяемые действием ядерных излучений на вещество.

В результате взаимодействия излучения с веществом часть энергии излучения передается атомам вещества. Если атом получает достаточно сильный толчок, то он может быть выбит из кристаллической решетки. Образующаяся в результате пара (смещенный атом — вакансия) может оказаться устойчивой, если атом уйдет от вакансии на расстояние больше одного периода решетки. По данным С. Т. Конобеевского, минимальная энергия, необходимая для устойчивого смещения атома, лежит в диапазоне 25—75 эв [40].

Вещество, находящееся в активной зоне реактора, подвергается бомбардировке нейтронами, образующимися при делении ядерного топлива, а также облучению электронами и γ -лучами, возникающими в процессе радиоактивного распада продуктов деления. При столкновении быстрого нейтрона с атомом образуется целый каскад смещений. При этом все вначале выбитые атомы, имеющие энергию в тысячи и десятки тысяч электронвольт, способны сами создавать дальнейшие поколения смещенных атомов в результате упругого соударения. Таким образом возникают сложные комплексы дефектов.

Взаимодействие медленных нейтронов с веществом характеризуется, как правило, захватом нейтрона ядром атома. Этот захват сопровождается переходом атома в возбужденное состояние с последующим испусканием нейтрона меньшей энергии, либо γ -кванта, либо другой ядерной частицы. Наиболее вероятно поглощение нейтрона с испусканием γ -кванта (радиационный захват). Испускание γ -кванта сопровождается отдачей атома в противоположную сторону, в результате чего также могут возникнуть дефекты решетки. Хотя количество этих дефектов значительно меньше, чем в случае воздействия быстрого нейтрона, но, если облученное вещество имеет большое сечение захвата, оно может быть все же значительным.

При облучении электронами энергия отдается атомам малыми порциями, недостаточными для того, чтобы первично выбитый атом мог вызвать дальнейшие смещения. Поэтому в результате рассеяния электронов в веществе образуются лишь одиночные дефекты. Действие γ -квантов на вещество по результатам близко к облучению электронами, поскольку γ -кванты взаимодействуют с атомами облучаемого вещества не непосредственно, а через образованные ими быстрые электроны. Благодаря малому поглощению γ -кванты глубоко проникают в вещество, поэтому глубина повреждения вещества в этом случае значительно больше, чем при облучении электронами. Однако интенсивность воздействия γ -квантов соответственно меньше.

Природа дефектов, образующихся в результате облучения электронами и γ -квантами, исследована значительно полнее, чем природа нарушений, вызываемых быстрыми нейтронами. Сложность явления при облучении быстрыми нейтронами, как указывалось выше, обусловлена большой энергией, получаемой первыми атомами, выбиваемыми из кристаллической решетки. Выбитые атомы в результате соударений образуют целый каскад нарушений, занимающих опре-

деленную область. Линейные размеры такой области достигают 100—200 Å, если энергия первого выбитого атома порядка 10^4 эв [41].

Появление в облученных материалах одиночных дефектов решетки, состоящих из вакансий и смещенных атомов, является первичной основой радиационного повреждения. Если эти единичные дефекты находятся вблизи один от другого, они легко рекомбинируют с полным уничтожением радиационного эффекта. Иногда смещенные атомы удаляются на значительные расстояния от вакансий, и связь между ними теряется. При нагревании вещества подвижность вакансий и смещенных атомов возрастает и они перемещаются по решетке. Блуждающий дефект может соединиться с полярным ему дефектом с последующей полной рекомбинацией. Таким образом, в результате нагревания в облученных материалах происходит отжиг радиационных дефектов.

Накопление дефектов при облучении изменяет структуру материалов и влияет на их физические и механические свойства. Например, в меди концентрация вакансий в количестве 1 ат. % создает добавочное удельное сопротивление 1,3—1,4 мком·см, а в золоте и серебре — до 1,5 мком·см.

По данным С. Т. Конобеевского, при облучении углеродистой стали интегральным потоком быстрых нейтронов 10^{20} нейтрон/см² предел текучести последней увеличивается от 50 до 100—120 кг/мм², а удлинение падает с 20—30 до 2—5%. У нержавеющей стали 1Х18Н9Т предел текучести повышается с 20—30 до 90—100 кг/мм², а удлинение уменьшается с 60—70 до 40% [40]. В результате облучения металл становится более хрупким.

Исследование влияния облучения на некоторые полупроводники показало, что появление радиационных повреждений приводит к заметному изменению ТЭДС, удельного электрического сопротивления и прочности. Облучение образцов теллуристого свинца интегральной дозой $4,6 \cdot 10^{16}$ электрон/см² при температуре 538°С не оказало заметного влияния на их размеры [42]. Однако прочность материала значительно снизилась, он стал очень хрупким. Удельное электрическое сопротивление после облучения у различных образцов возросло на 11—22%.

Исследования кремния, облученного электронами с энергией 1,5 Мэв при комнатной температуре, показали, что основными радиационными дефектами являются комплексы кислород—вакансия при содержании кислорода до 10^{18} атом/см³ и комплексы примесь—вакансия при содержании кислорода 10^2 атом/см³ [41]. В основном все остаточные дефекты в кристаллах кремния рождаются в результате взаимодействия единичных вакансий с атомами примесей.

Интересные результаты были получены в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова при облучении термоэлементов из сплава кремний — германий в потоках нейтронов и γ -излучения [43]. Элементы облучались в реакторе РФТ интегральным потоком тепловых нейтронов $3 \cdot 10^{19}$ нейтрон/см² и не показали заметных изме-

нений термоэлектрических характеристик. Позднее эти результаты были подтверждены опытом эксплуатации установки «Ромашка», в которой кремний-германиевые элементы проработали 15 тыс. часов в потоке быстрых нейтронов.

В работе [44] приведены результаты экспериментов по облучению образцов из сплавов Bi_2Te_3 и $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Se}_3$ в потоке тепловых нейтронов. Теллурид висмута имел крупнозернистую поликристаллическую форму, а другие сплавы использовались как в форме крупнозернистых поликристаллов, так и в спеченном виде. Облучение проводилось на реакторе NIFAR Комиссии по атомной энергии Австралии интегральным потоком тепловых нейтронов $2 \cdot 10^{18}$ нейтрон/см². Термоэлектрические свойства до и после облучения измерялись при температуре 300° К. Измерение облученных образцов проводилось через несколько месяцев после их удаления из реактора с целью снизить наведенную активность до безопасного уровня. До начала заключительных измерений облученные образцы помещали в вакуум, чтобы предотвратить их окисление. Результаты испытаний образцов указаны в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Изменение термоэлектрических свойств материалов до и после облучения тепловыми нейтронами

Материал	Тип проводимости	$\sigma, \text{ом}^{-1} \times \text{см}^{-1}$		$\kappa, \text{вт/(см} \cdot \text{град)}$		$\alpha, \text{мкв/град}$		$Z, 10^{-3} (\text{град})^{-1}$		Концентрация носителей, 10^{18} см^{-3}	
		до облучения	после облучения	до облучения	после облучения	до облучения	после облучения	до облучения	после облучения	до облучения	после облучения
Bi_2Te_3 поликристаллический	p	885	781	28,5	28,0	226	226	1,59	1,43	7,0	6,3
Bi_2Te_3 поликристаллический	n	1190	1051	28,2	27,2	211	217	1,88	1,83	6,5	5,8
$\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ поликристаллический	p	735	769	21,4	21,5	226	226	1,76	1,83	4,9	4,8
$\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Se}_3$ поликристаллический	n	695	568	21,9	20,6	220	233	1,54	1,50	6,4	4,8
$\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ спеченный	p	358	342	14,5	14,1	270	261	1,81	1,65	2,8	3,1
$\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Se}_3$ спеченный	n	388	345	14,4	13,9	231	235	1,44	1,34	4,7	5,0

Электропроводность спеченного материала $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ снизилась на 5%, а поликристаллического сплава $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Se}_3$ на 17%.

В поликристаллических материалах, как указывают авторы, снижение электропроводности обусловлено в основном изменением концентрации носителей, а в спеченных материалах — изменением подвижности носителей.

Н. Ф. Правдюк и др. [45] исследовали влияние реакторного излучения на свойства термопарных материалов, таких, как констан-

тан, копель, алюмель и др. Образцы выбранных материалов отжигались в течение 3 ч при 700° С и затем загружались в реактор РФТ. После облучения интегральным потоком $10^{19} - 10^{20}$ нейтрон/см² составлялась пара из необлученного образца-свидетеля и облученного образца и измерялось изменение термоэлектрических свойств для каждого материала. С целью устранения возможности отжига холодные спаи образцов находились при температуре жидкого азота (−196° С), а горячие спаи — при 25° С. Приведенные в табл. 4.6 данные показывают, что знак изменения ТЭДС у исследованных материалов не одинаков.

Таблица 4.6

Изменение ТЭДС некоторых термопарных материалов после облучения

Материал	Поток быстрых нейтронов, 10^{20} нейтрон/см ²	Изменение ТЭДС, мкв/град
Константан	1,1	+0,12
Копель	1,8	+0,19
	0,35	+0,29
Алюмель	1,2	+0,25
	0,9	+0,37
Хромель	1,0	−0,20
Платина	1,8	−0,08
Сплав: платина + 13% родия	1,8	−1,04

Примечание. Образец стал электроположительным по сравнению с необлученным.

В работе [46] исследовалось влияние реакторного излучения на электропроводность, ТЭДС и сопротивление сжатию термоэлектрических материалов на основе теллурида германия, легированного висмутом, медью и сурьмой, а также бинарных сплавов PbTe, легированных PbI₂ и PbCl₂. Образцы готовились методом порошковой металлургии и в течение длительного времени отжигались для снятия неоднородности свойств пресованных материалов. Измерения электрических параметров (электрической проводимости и ТЭДС) проводились как в процессе облучения в реакторе, так и после облучения.

Образцы помещались в экспериментальный неохлаждаемый канал активной зоны реактора и облучались потоком плотностью $3 - 5 \cdot 10^{13}$ нейтрон/(см²·сек). При этом образец за счет поглощения в основном γ -излучения мощностью около 700 рад/сек нагревался до 500—550° С. Эта температура близка к рабочей температуре исследуемого типа среднетемпературного материала.

Для исследований были выбраны образцы теллурида германия двух типов: легированные висмутом (2,6%) и легированные висмутом (5,2%) и медью (0,9%) На этих образцах снималась температурная зависимость электропроводности при облучении и без облучения (контрольные образцы). Образцы, облучаемые в течение 1—1,5 ч, получили интегральную дозу до 10^{17} нейтрон/см². При $t \approx 500^\circ \text{C}$

КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ И ОСОБЕННОСТИ ТЭЭЛ

§ 5.1

Конструктивные схемы ТЭЭЛ

электропроводность после облучения приблизительно в десять раз меньше электропроводности образца при той же температуре без облучения.

Наблюдаемые изменения электропроводности образцов авторы объясняют эффектом трансмутационного легирования при облучении медленными нейтронами по реакции (n, γ) , в результате чего образуются новые химические элементы. Количество возникающих в результате ядерной реакции атомов можно оценить по формуле

$$N_a = \Phi \sigma N P,$$

где Φ — интегральный поток, нейтрон/см²; σ — сечение захвата, 10⁻²⁴ см²; N — число атомов изотопа, вступающих в реакцию, см⁻³; P — процентное содержание данного изотопа в образце.

При облучении образцов интегральной дозой 2·10²⁰ нейтрон/см² в результате реакций (n, γ) образуются новые радиоактивные изотопы (Ga, As, Se, I, Xe, Zn, Ni, Pb) в количестве до 0,03%. Этот процесс идет в два этапа. На первом этапе во время облучения в реакторе происходит радиационное легирование путем интенсивного образования радиационных дефектов. На втором этапе после облучения идет в основном радиационное легирование за счет радиоактивного распада образующихся стабильных изотопов. В результате этих последовательных трансмутационных преобразований появляется сложный состав примесей, влияющих на изменение электрических свойств образца.

В работе [47] исследовано также влияние реакторного облучения на изменение ТЭДС. Полученные результаты показали, что эта характеристика слабо изменялась в процессе облучения. Исследовалось влияние γ -излучения на механические свойства термоэлектрических материалов. Образцы облучались на кобальтовой установке при мощности дозы 750—800 рад/сек и температуре 47—50° С (табл. 4.7).

Таблица 4.7

Влияние γ -облучения на некоторые механические свойства термоэлектрических материалов

Материал	$\sigma_{\text{сжат}}, \text{ кг/мм}^2$		$\sigma_{\text{изгиб}}, \text{ кг/мм}^2$		Полная пластическая деформация, %	
	до облучения	2000 Мрад	до облучения	2000 Мрад	до облучения	1300 Мрад
PbTe n -тип	4,75	10,1	4,3	4,5	0,68	0,67
PbTe p -тип	4,50	8,6	2,14	2,25	—	—
GeTeBi _{0,028}	—	—	—	—	0,12	0,12
GeTeBi _{0,05} Cu _{0,009}	—	—	—	—	0,11	0,10
GeTeBi _{0,02} Cu _{0,03}	—	—	—	—	0,09	0,095
Sb _{0,029}	—	—	—	—	—	—

Из табл. 4.7 видно, что прочность на изгиб и пластичность существенно не изменяются под действием излучения. Напряжение при сжатии у образцов PbTe при интегральной дозе 2000 Мрад увеличилось более чем в два раза.

Введение. Основным узлом конструкции ТЭГ является термоэлектрический элемент, в котором происходит преобразование тепловой энергии в электрическую. Предложено и осуществлено большое количество конструктивных модификаций ТЭЭЛ. Ветви ТЭЭЛ могут быть из одного или нескольких ТЭМ, иметь цилиндрическую, призматическую, кольцевую, ленточную, пленочную или любую другую форму, могут предназначаться для работы в вакууме, на воздухе, под давлением инертных газов и т. п. Подвод тепла и охлаждение спаев может осуществляться теплоносителем, непосредственным контактом ТЭЭЛ с источником тепла и холода или посредством лученспускания. Соединительные шины, изоляция, коммутационные припои и другие вспомогательные узлы могут быть сильно развиты или вовсе отсутствовать.

На рис. 5.1 показана принципиальная схема соединения ТЭЭЛ в батарею.

Разрабатывавшиеся в последнее время конструктивные схемы ТЭЭЛ, применяемых в промышленности, отличаются большим разнообразием. Исходная принципиальная схема наиболее совершенного слоистого ТЭЭЛ с основными элементами конструкции приведена на рис. 5.2. Однако в большинстве случаев конструктивное осуществление ТЭЭЛ сильно отличается от этой исходной схемы по форме ветвей, конструкции соединительных шин, назначению, источнику тепла, твердому или жидкому состоянию полупроводника и т. д. Ниже указаны некоторые схемы ТЭЭЛ, используемые в ТЭГ, а также схемы ТЭЭЛ, представляющие интерес для будущих разработок (схемы ТЭЭЛ, применявшиеся в начальный период развития термоэлектрической энергетики, указаны в гл. 1).

ТЭЭЛ с запрессованными электродами. Используя порошковую металлургию, можно изготавливать термоэлементы из константана с запрессованными электродами. Металлическая ветвь может быть из прутка или ленты. Выходящие наружу концы ветви после прессовки каждого столбика сваривают для получения блока из нескольких ТЭЭЛ. На рис. 5.3 показан такой блок из нескольких ТЭЭЛ.

Технология изготовления ветвей ТЭЭЛ с запрессованными в них электродами заключается в том, что с помощью пресс-формы полу-

чают заготовку на несколько (8—16 ветвей) термоэлементов с соответствующим количеством пар запрессовываемых контактов. На рис. 5.4 схематически показана такая заготовка из SbZn и константановой проволоки. Заготовка в дальнейшем разрезается на отдель-

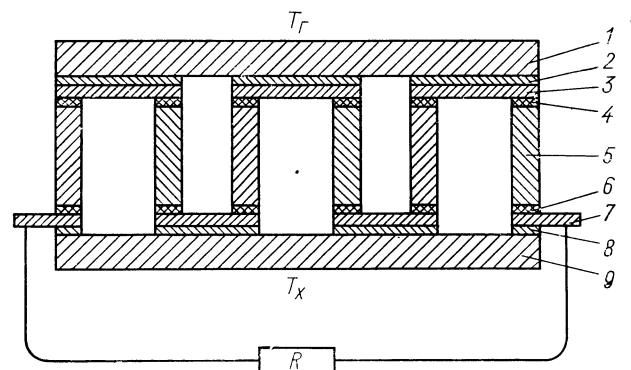


Рис. 5.1. Принципиальная схема батареи из трех ТЭЭЛ: 1 — коллектор подвода горячего теплоносителя; 2 и 8 — электрическая изоляция между коллекторами горячего или холодного теплоносителя и токопроводами; 3 и 7 — токопроводы; 4 — коммутационный припой горячего спая; 5 — ТЭМ *n*- или *p*-типа; 6 — коммутационный припой холодного спая; 9 — коллектор подвода охлаждающего теплоносителя; *R* — полезная нагрузка.

ные ветви ТЭЭЛ, как это показано на рис. 5.4 пунктиром, карборундовыми дисками, вращающимися с большой скоростью. Соединение ветвей в батарею проводится при помощи электросварки. Этим спо-

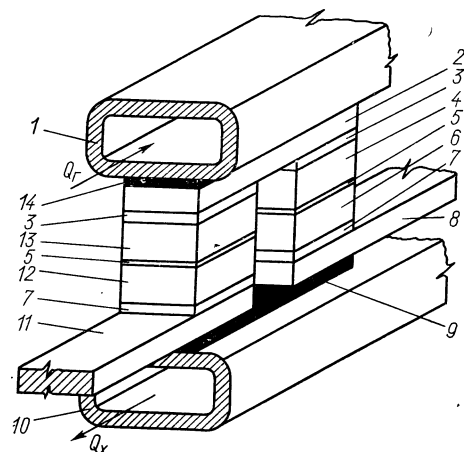


Рис. 5.2. Схема термоэлектрического элемента:

1 — подвод горячего теплоносителя; 2 — соединительная шина горячего спая; 3 — коммутационный припой горячего спая; 4 — *p*-ветвь (горячая часть); 5 — коммутационный припой между слоями ТЭМ; 6 — *p*-ветвь (холодная часть); 7 — припой холодного спая; 8 — соединительные шины холодного спая; 9 и 14 — изоляция; 10 — отвод тепла хладагентом; 11 — соединительные шины холодного спая; 12 — *n*-ветвь (холодная часть); 13 — *p*-ветвь (горячая часть).

собом изготавливались батареи ТЭЭЛ для генераторов ТГК-10 и других ТЭГ мощностью 16—36 *вт*, описанных в гл. 6. Особенности изготовления ТЭЭЛ методом порошковой металлургии осветили А. Н. Воронин и Р. З. Гринберг [1]. Они оценили влияние термооб-

работки, значение величины зерна и других факторов для Bi_2Te_3 — Sb_2Te_3 и Bi_2Te_3 — Bi_2Se_3 . В частности, эти авторы определяли и механические характеристики указанных сплавов. Технология изготовления пресованных ТЭЭЛ из PbTe и из Bi_2Te_3 — Sb_2Te_3 с коммутацией сплавом NiBi описана Ю. Н. Малевским и А. С. Охотиным [2].

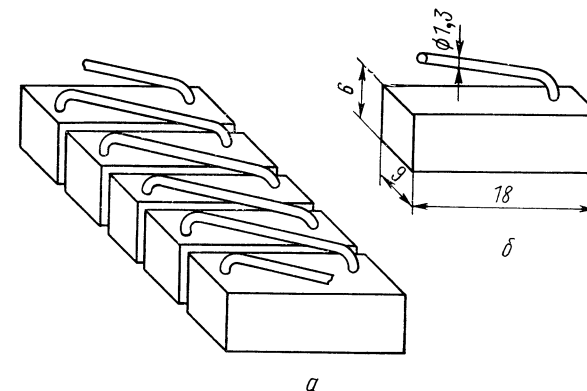


Рис. 5.3. Батарея ТЭЭЛ (а) для ТЭГ ТГК-10 из ZnSb и константа, собранная из отдельных элементов (б).

Следует заметить, что в ТЭЭЛ этого типа (с запрессованными электродами) рабочая длина ветви меньше высоты полупроводникового столбика, так как контакт металлического прутка с полупроводником осуществляется на некотором расстоянии от верха и низа столбика (см. рис. 5.3). Поэтому при малой длине ветви ТЭЭЛ неизбежные потери температуры могут быть велики (десятки процентов).

ТЭЭЛ с припаянными чашечными электродами. При использовании пайки для соединения ветвей ТЭЭЛ возможно раздельное изготовление ветвей термоэлементов с применением для каждого материала оптимальной технологии. Особенно эффективна такая технология раздельного изготовления ветвей ТЭЭЛ, когда одной из ветвей ТЭЭЛ является металл, который может служить одновременно и коммутирующим элементом. На рис. 5.5 показана схема блока ТЭЭЛ, изготовленного из SbZn (1) и константана (2). Здесь константановая лента (ветвь) имеет форму перемычки с двумя чашками по концам. Чашки надевают на концы столбиков из SbZn и припаивают по специальной техно-

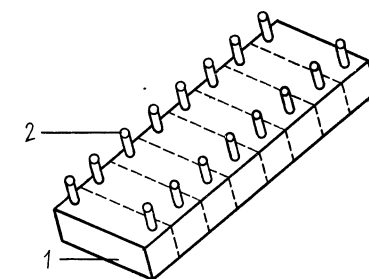


Рис. 5.4. Заготовка из SbZn (1) и константановой проволоки (2) для изготовления ТЭЭЛ.

логии. В таких ТЭЭЛ можно обеспечить хорошую компенсацию температурных деформаций и свести к минимуму потерю температурного градиента. Подобная конструкция ТЭЭЛ применялась в СССР для некоторых ТЭГ на жидком топливе.

ТЭЭЛ с гибкими коммутирующими шинами. Для уменьшения термических напряжений в ТЭЭЛ создают возможность некоторого изменения размеров коммутирующих шин при различных режимах работы ТЭГ, используя конструкции ТЭЭЛ с гибкими коммутационными шинами. Один из вариантов схемы такой конструкции показан на рис. 5.5. Здесь металлические шины, соединяющие горячие и холодные стороны термостолбиков, имеют пружинящее звено, деформация которого позволяет компенсировать изменение геометрических

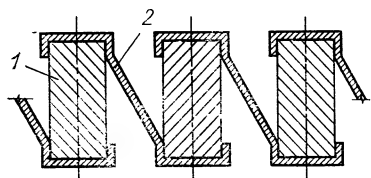


Рис. 5.5. Схема блока ТЭЭЛ с шашечными электродами.

размеров батареи при нагревании и охлаждении. Таким звеном может быть изогнутая часть шины, деформирующаяся тонкая лента, проволока и т. д.

Именно такой способ компенсации термических расширений использован в конструкции ТЭГ СНАП-10А, описанного в гл. 8. В этом случае 72 столбика из кремний-германиевого сплава жестко крепятся на внешних поверхностях трубок, по которым с помощью жидкометаллического теплоносителя подводится тепло к горячим спаям ТЭЭЛ. Столбики коммутируются по горячей стороне медными, а по холодной — алюминиевыми пластинами с компенсаторами термических расширений. Результаты испытаний показали, что такая конструкция обеспечивает достаточную надежность работы преобразователя без разрушения ТЭЭЛ.

К недостаткам конструкции ТЭЭЛ с гибкими компенсаторами в соединительных шинах следует отнести увеличение общей площади батареи ТЭЭЛ из-за большого расстояния между термостолбиками. Это приводит к непроизводительным утечкам тепла и заметному увеличению веса установки.

Герметизированный ТЭЭЛ с прижимными контактами. В некоторых конструкциях ТЭГ контакт источника тепла и термоэлемента и контакты в самой термоэлектрической цепи достигаются с помощью пружин, сильфонов или других пружинящих деталей. Такой способ создания контактов дает возможность компенсировать термические расширения ТЭЭЛ за счет прижимных пружин, а в сочетании прижимных контактов с гибкими соединительными шинами может исключить влияние температурных деформаций. Применение прижимных контактов значительно упрощает монтаж батареи ТЭЭЛ и обеспечивает возможность замены ТЭЭЛ или источника тепла без нарушения целостности узлов ТЭГ. Однако при этом усложняется конструкция ТЭГ и ухудшается подвод тепла.

В гл. 7 показаны варианты конструкции, в которых ТЭЭЛ с помощью пружин прижимаются к источнику тепла.

Герметизированные ТЭЭЛ. Одно из эффективных усовершенствований конструкции ТЭЭЛ — применение герметизации отдельных ТЭЭЛ, батарей ТЭЭЛ и всего ТЭГ. Герметизацией можно уменьшить или вовсе исключить различные формы коррозии и сублимации ТЭМ и таким образом достичь стабильности самих ТЭЭЛ и обеспечить минимальные изменения контактных сопротивлений.

Зачехление ТЭЭЛ из некоторых халькогенидов, являющихся эффективными среднетемпературными ТЭМ и нуждающихся в защите от испарения и окисления, изучалось Р. С. Амбарцумяном и др. [3].

Рассмотрены способы герметизации ТЭЭЛ из PbTe и GeTe с железными токопроводами. Для зачехления использовали ковар марки НЗЗК18Т, медь М-1, припой ПСР-72 (на основе серебра) и керамику в форме цилиндров внутренним диаметром 15,7 мм, толщиной стенок 0,3—0,5 мм и высотой 12 мм.

Для подготовки к пайке манжет из ковара края керамики металлизировали по молибдено-марганцевой технологии с последующим гальваническим никелированием. Манжеты паялись к чехлу медно-марганцевым припоем при 1050°С в вакууме.

Результаты испытаний образцов ТЭЭЛ из PbTe и GeTe при 500—600°С до и после заключения в керамику указанным методом показали, что такие характеристики, как термо-э. д. с., электросопротивление и удельная мощность ($вт/см^2$), изменяются слабо.

Изучение модулей после 200 ч испытаний при перепаде 200°С (с 600 до 400°С) в вакууме 10^{-2} — 10^{-3} мм рт. ст. показало, что начальный вес образцов (23—29 г) в большинстве случаев уменьшился на 0,036—0,057 г. При понижении температуры горячего спая до 500—550°С резко увеличивались воспроизводимость характеристик и стабильность батарей.

Один из вариантов герметизированной термоэлектрической батареи описан в работе [4]. Как показано на рис. 5.7, в герметизированном корпусе из тонкой стали 4 или другого подходящего материала создается вакуум около 10^{-4} мм рт. ст.

В корпусе размещена группа ТЭЭЛ 1, скоммутированных пластинами 2, которые изолированы от стенок лаком, полимеризующимися смолами, стеклопластиковыми и т. п. 3. Электрические шины выходят из герметизированного объема через гермовводы 5.

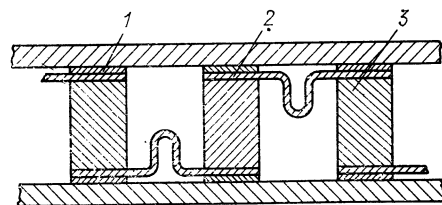


Рис. 5.6. Термоэлементы с гибкой коммутирующей шиной:

1 — изоляция; 2 — гибкая коммутирующая шина; 3 — термоэлектрический материал.

К вариантам с герметизированными батареями ТЭЭЛ можно отнести опубликованный в 1966 г. вариант конструкции ТЭГ, основанный на запрессовке ТЭЭЛ в массу изоляционного материала, который изготовлен из 10 частей портландцемента, трех частей асбеста и десяти частей воды. Блоки прессуют под давлением 200 кг/см^2 и выдерживают в вакууме при 20°C в течение 72 ч. Указывается на возможность использования подобных устройств до температуры 300°C .

Американская фирма «Вестингауз электрик» сообщила в 1968 г. о разработке ТЭГ в модульном исполнении, который может работать на воздухе и в жидкостях (в погруженном состоянии) [5].

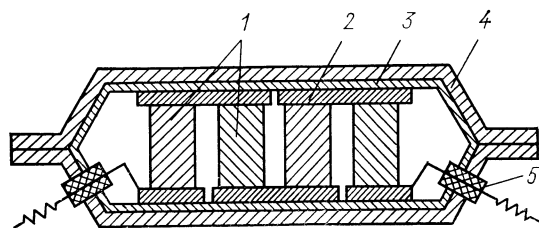


Рис. 5.7. Герметизированная батарея ТЭЭЛ.

Модули могут быть изготовлены разной мощности, несколько модулей можно соединить в один блок электрической мощностью в десятки киловатт [6].

С помощью моделей из герметизированных ТЭЭЛ можно значительно повысить стабильность работы ТЭГ, однако при этом имеют место дополнительные потери тепла при его подводе и отводе, а в некоторых случаях может иметь место и сублимация материалов.

ТЭЭЛ для низковольтного ТЭГ. Иногда требуются кратковременные импульсы тока, возникающие в результате повышения температуры (как, например, в устройствах пожарной сигнализации). Примером таких ТЭГ может служить английская конструкция (рис. 5.8), состоящая из одного или двух ТЭЭЛ, изготовленных на основе низкотемпературных ТЭМ — теллуридов или селенидов [6].

Термогенератор заключен в цилиндрический корпус из полиэтилена. В этом корпусе имеются два канала, в которые помещаются ветви термоэлемента, соприкасающиеся с тепло-и электропроводящей крышкой, которая осуществляет соединение ветвей. Эта крышка обращена в сторону предполагаемого источника тепла. Горячие концы термоэлектрических ветвей покрыты тонким слоем свинцово-оловянистого сплава для улучшения контакта, который достигается прижатием крышки с помощью винтов. Холодные концы ветвей контактируют с блоком отвода тепла из материала с хорошей теплопроводностью (алюминий).

При испытаниях, когда крышка была помещена против источника тепла — металлического блока, нагретого до 140°C , напряжение генератора достигало 35 мВ , внутреннее сопротивление — $0,045 \text{ Ом}$.

ТЭЭЛ с переменным сечением ветвей. В большинстве случаев ТЭЭЛ изготавливаются в форме цилиндра или призмы с ветвями одинакового сечения по длине. Однако были предложены и применялись ТЭЭЛ с переменным сечением ветвей для повышения к. п. д., экономии ТЭМ и других целей. Такие ТЭЭЛ с переменным сечением ветвей из PbS и SbZn изготавливались в СССР в конце Великой Отечественной войны. Ветвь из PbS имела равномерно уменьшающееся сечение от горячего конца к холодному. А. Х. Черкасским [7] был предложен другой вариант с переменным сечением ветвей для уменьшения расхода материала и увеличения гибкости батарей. В этом ТЭЭЛ ветви изготавливаются с плавно уменьшающимся сечением и для увеличения гибкости — из нескольких одинаковых пластин.

Трубчатые ветви термоэлементов. Для улучшения контакта между ветвью ТЭЭЛ и коммутационными пластинами предложена конструкция термостолбиков, основанная на применении развитой поверхности контакта. На рис. 5.9 показана схема такого ТЭЭЛ. Ветви термоэлемента 2, 3 соединяются с помощью коммутационных пластин 4, изготавливаемых из материала с хорошей теплопроводностью и электропроводностью, например, из меди.

В этих коммутационных пластинах имеются кольцевые пазы 5, в которые вставляются концы ветвей и там запаиваются 6. Для удаления газов при пайке предусмотрены выпускные отверстия 1.

Трубчатая форма ветвей обеспечивает высокую прочность всей конструкции. Площадь контакта, занимаемая припоем, существенно больше, чем у сплошных термоэлементов (одинаковых по длине и весу). Преимущество такой конструкции заключается в том, что тепло подводится к ветвям значительно лучше, так как увеличивается площадь, через которую идет тепловой поток. Это позволяет улучшить теплообмен между коммутационной пластиной и ветвью термоэлемента.

Очевидно, что сечение ветвей ТЭЭЛ может быть и прямоугольным, и другого сечения. Следует иметь в виду, что трубчатая форма ветви создает очень жесткое соединение с коммутирующей шиной. Поэтому целесообразно применять гибкие звенья в шинах.

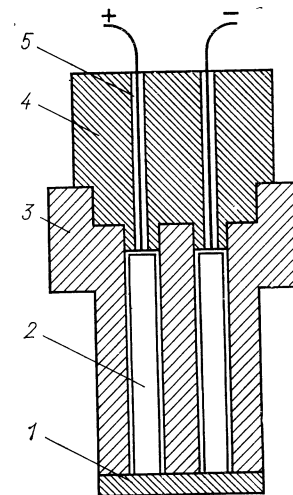


Рис. 5.8. Низковольтный ТЭГ:

1 — теплопроводящая и коммутирующая пластина; 2 — ветвь ТЭЭЛ; 3 — цилиндрический корпус; 4 — блок отвода тепла; 5 — канал для проводника тока.

Батарея ТЭЭЛ, смонтированная на длинной трубе. Труба как исходный элемент конструкции ТЭГ издавна привлекала внимание, так как подвод и отвод тепла жидким теплоносителем чаще всего связан с трубопроводами. ТЭГ с подводом и отводом тепла трубами можно представить в виде некоего теплообменника, в который подается нагретый теплоноситель и охлаждающий агент. Эта общая конструктивная схема пригодна для мощных установок как на обычном топливе, так и в случае применения ядерных реакторов.

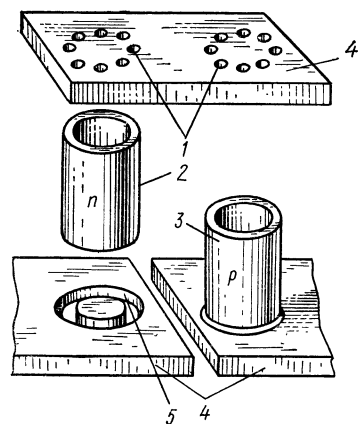
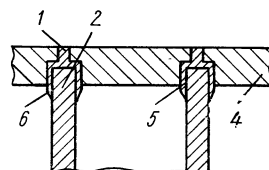


Рис. 5.9. Трубчатый ТЭЭЛ.

Схема ТЭГ, состоящего из кольцевых ТЭЭЛ, в сборе образующих трубу, была предложена в России Я. Казаковым еще в 1898 г. На рис. 5.10



охлаждающая труба с внешней стороны имеет кожух, по которому протекает вода. ТЭЭЛ от внутренней трубы изолированы стеклом или асбестом. ТЭЭЛ, расположенные в начале трубы и работающие при

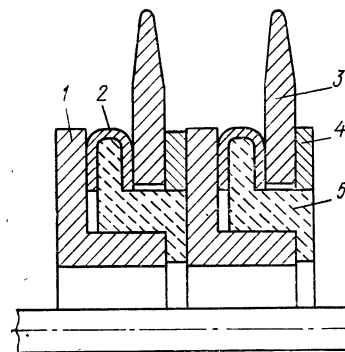


Рис. 5.10. ТЭГ Я. Казакова:
1 — горячее ребро; 2 — ветвь из нейзильбера; 3 — холодное ребро; 4 — ветвь из SbZn; 5 — изоляция из асбеста.

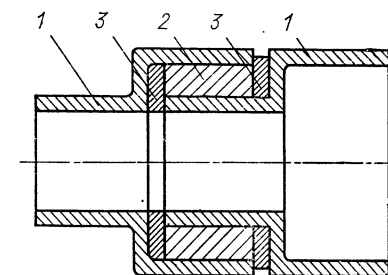


Рис. 5.11. ТЭГ Н. В. Никольского:
1 — электрод; 2 — термоэлектрик; 3 — изоляция.

показана схема такой батареи из нейзильбера и SbZn (12,2 части сурьмы и 6,5 частей цинка) с воздушным охлаждением и подводом тепла горячей водой. На рис. 5.11 показана батарея Н. В. Никольского (1928 г.) также из кольцевых элементов.

Дальнейшее развитие ТЭЭЛ, смонтированного на длинной трубе, предложено Н. С. Лидоренко и др. [8]. На рис. 5.12 показана разработанная ими конструктивная схема батареи. В этом случае ветви ТЭЭЛ из полупроводников могут быть изготовлены заранее, а ТЭЭЛ последовательно собраны из элементов. К этой же группе батарей ТЭЭЛ на трубе может быть отнесена французская схема, предложенная в 1965 г. ТЭЭЛ состоит из полых усеченных конусов, вставленных один в другой, с изолирующей слюдяной прокладкой между ними. Такие пары можно соединять в большую батарею и пропускать через внутренний канал горячий газ. Следует заметить, что в указанной схеме предусматривалось использование ветвей ТЭЭЛ из материалов с различными коэффициентами линейного расширения в напряженном состоянии (растянутом и сжатом).

В США была разработана многокиловаттная батарея с использованием трубчатых ТЭГ. Шесть батарей ТЭЭЛ размещены вдоль зазора между концентрично расположенными греющей и охлаждающей трубами. Во внутреннюю греющую трубу предусматривается подача газа при 1360°С, который на выходе имеет 135°С. Наружная

большой разности температур, изготавливаются из трех слоев ТЭМ: в средней части — из двух слоев, в конце — из одного слоя.

Указанные примеры иллюстрируют эволюцию этого типа ТЭЭЛ, однако ее не следует считать закончившейся.

ТЭГ с различной высотой ветвей. В некоторых случаях подвод тепла к группам ТЭЭЛ осуществляется неравномерно, так что часть ТЭЭЛ, имеющая интенсивный подвод тепла, перегревается, а другая часть работает с малым температурным перепадом. Это ведет к снижению к. п. д. установки и другим недостаткам. Для устранения неравномерности нагрева ТЭЭЛ могут быть применены различные конструктивные средства, одно из которых — использование соответствующим образом подобранных ТЭЭЛ разной высоты. В Физическом институте АН АзССР в 1965 г. была изготовлена и испытана конструкция солнечного ТЭГ с применением таких ТЭЭЛ [9]. Высота ТЭЭЛ уменьшалась с увеличением интенсивности подвода тепла по радиусу светового пятна. Было применено семь концентрических рядов ТЭЭЛ с длиной ветвей в каждом ряду по 23, 20, 16, 12, 8,5, 6,6 и 6 мм. Радиус кольцевых секций был соответственно 100, 90, 80, 70, 60, 50, 40 и 30 мм.

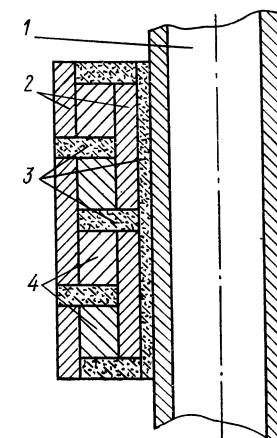


Рис. 5.12. ТЭГ Н. С. Лидоренко:

1 — труба с теплоносителем; 2 — электрод; 3 — изоляция; 4 — термоэлектрический материал.

Холодные концы ТЭЭЛ с температурой не выше 42°C находились в контакте с полым диском, имеющим ступени в соответствии с длинами ТЭЭЛ. В диск вводилась охлаждающая вода. Горячие спаи ТЭЭЛ располагались в одной плоскости и имели температуру около $168\text{--}210^{\circ}\text{C}$. ТЭЭЛ в количестве 123 штук были изготовлены из $\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Sb}_2\text{Te}_3$ (p -тип) и $\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Bi}_2\text{Se}_3$ (n -тип) и развивали мощность 16 Вт.

Батарея ТЭЭЛ для холодильных установок. Рассмотрение устройств, в которых термоэлектрические явления используются для получения тепла или холода, не входит в задачу данной книги. Однако термоэлектрический тепловой насос — обратимая машина, которая может быть использована для получения электроэнергии. Поэтому ниже описывается часто встречающаяся схема батареи ТЭЭЛ теплового насоса, показанная на рис. 5.13 [10].

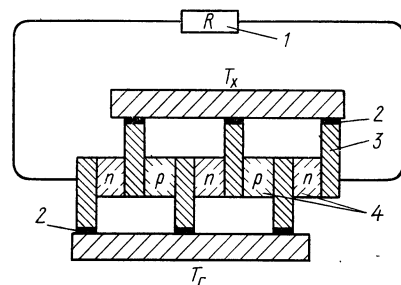


Рис. 5.13. Схема термоэлектрической батареи для холодильных установок: 1 — полезная нагрузка; 2 — изоляция; 3 — пластины для подвода и отвода тепла; 4 — термоэлектрики.

Пластины из полупроводников n - и p -типа, например, $\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Bi}_2\text{Se}_3$ (n -тип) и $\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Sb}_2\text{Te}_3$ (p -тип), образуют термоэлектрическую цепь. Подвод и отвод тепла осуществляется медными пластинами, спаянными с полупроводниками мягким припоем, поскольку в данном случае температура ТЭЭЛ близка к комнатной или даже отрицательная. Медные пластины должны быть изолированы от токопроводящих источников тепла и холода с помощью слюды, окиси алюминия или других материалов. Однако подобная батарея может быть осуществлена и без указанных изоляционных слоев, понижающих эффективность устройства, если подвод тепла и холода осуществляется диэлектрическими теплоносителями.

Батарея с диэлектрическим теплоносителем. Имеется большое количество различных схем термоэлектрических батарей, основанных на непосредственном нагревании ТЭЭЛ с помощью диэлектрического теплоносителя. К таким теплоносителям в первую очередь относятся газы и органические жидкости. Применение диэлектриков для подвода и отвода тепла привлекало многих авторов в связи с тем, что в этом случае упрощается конструкция батареи ТЭЭЛ.

На рис. 5.14 показана принципиальная схема батареи ТЭЭЛ с диэлектрическим теплоносителем, в которой отсутствуют промежуточные шины. Батарея ТЭЭЛ состоит из столба элементов n - и p -типов 1, 2, находящихся в общем кожухе 8. В элементах одного типа из более дешевого материала 2 и наиболее удобного для обработки сделаны с обеих сторон каналы 3 и 4 для прохода теплоносителя. При-

чем каналы 3 на одной стороне элемента перпендикулярны каналам 4 на другой его стороне. Столб из элементов n - и p -типов уплотнен по углам кожуха пластинами 7, так что образуются четыре коллектора 5, 6, идущих вдоль столба элементов. В такой схеме горячий теплоноситель может по одному из коллекторов подводиться к одной стороне столба элементов, проходить по каналам и удаляться через второй коллектор, нагревая таким образом горячий спай ТЭЭЛ. Через два других коллектора аналогичным образом может проходить холодный теплоноситель и охлаждать холодные спаи ТЭЭЛ.

Указанная схема батареи, по-видимому, представляет интерес главным образом для ТЭГ большой мощности.

Батарея ТЭЭЛ из общей заготовки. В ходе поисков улучшения технологии производства ТЭЭЛ был предложен способ изготовления термоэлектрической батареи, состоящей из большого количества ТЭЭЛ, соединенных последовательно. Для упрощения технологии сначала изготавливается заготовка, представляющая собой одну короткозамкнутую термопару, состоящую из ветвей p - и n -типа, верхней (горячей) соединительной коммутационной пластины и такой же нижней (холодной) пластины.

Батарея изготавливается механической обработкой указанной заготовки. Сначала на коммутационных пластинах делается ряд удлиненных отверстий, которые на горячих и холодных сторонах ориентируются различно. После этого прорезают пазы в материале ветвей и коммутационных пластинах, причем пазы с одной стороны сдвинуты на полшага относительно пазов с другой стороны. Указанные пазы доходят до удлиненных отверстий. В результате такой механической обработки получается батарея из последовательно соединенных ТЭЭЛ, с числом ТЭЭЛ, равным количеству прорезов. Такой способ изготовления термоэлектрической батареи пригоден для осуществления высоко- и низковольтных ТЭГ.

Высоковольтные ТЭГ. В ряде случаев, например, для питания специальной радиоаппаратуры, необходимо иметь рабочее напряжение на зажимах ТЭГ $100\text{--}150$ в при малых токах. К. п. д. устройства, как правило, в таких случаях не имеет существенного значения. Разработано много конструкций термоэлектрических батарей, удовлетворяющих указанным требованиям. К их числу,

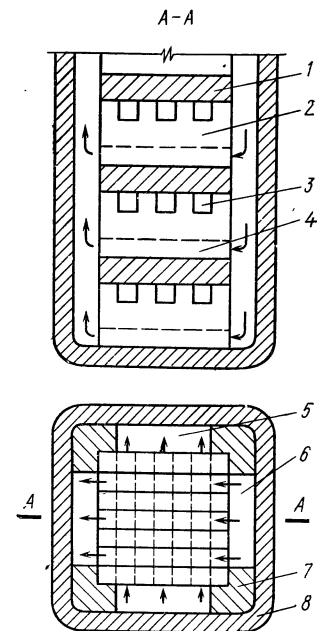


Рис. 5.14. Батарея с диэлектрическим теплоносителем.

например, относится батарея, предложенная в 1930 г. А. М. Гусевым, состоящая из асбестовой ленты, на которую натянуты проволоки из разнородных материалов, удерживающихся металлическими скобами по краям ленты. Эти скобы с одной стороны ленты служат для нагрева горячих спаев ТЭЭЛ, а другой — для охлаждения холодных спаев. Вся асбестовая лента свертывается в катушку, так что можно нагревать через скобы все горячие спаи.

А. Ф. Иоффе и Б. И. Болтакс [11] предложили конструкцию высоковольтных термоэлектрических батарей с полупроводниками. В этой конструкции полоска подходящего неэлектропроводного материала, например асбеста, прошивается константановой проволокой

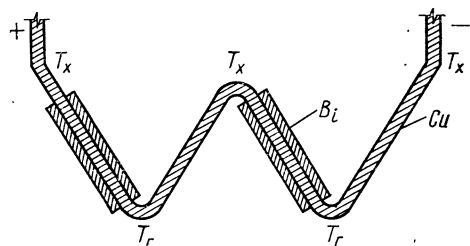


Рис. 5.15. ТЭЭЛ с тремя ветвями.

и укладывается между слоями полупроводникового материала. Весь комплект прессуется при давлении 2 T/cm^2 и при температуре 380°C . ТЭЭЛ с тремя ветвями. Классическая форма ТЭЭЛ из двух ветвей не является единственно возможной. В 1936 г. А. И. Дидебулидзе предложил ТЭЭЛ, состоящий из проволоки в качестве первого ТЭМ, половина которой покрыта слоем второго ТЭМ (гальваническим или другим способом). Таким образом, к нагретому узлу ТЭЭЛ подходят по существу две ветви из одного ТЭМ и ветвь из второго ТЭМ. На рис. 5.15 показана схема батареи такого ТЭГ из медной проволоки диаметром $0,7 \text{ мм}$, покрытой висмутом. Особенности такой трехэлементной батареи рассматриваются в работе М. М. Попова [12].

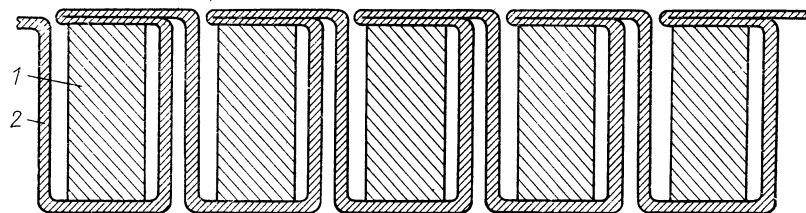


Рис. 5.16. Батарея ТЭЭЛ с тремя ветвями:
1 — полупроводниковый столбик; 2 — общий проводник.

Польские исследователи изучали схему подобного ТЭЭЛ и показали возможность использования в его конструкции термостолбиков из полупроводников, как показано на рис. 5.16. В таком ТЭЭЛ величина полезной ТЭДС меньше, чем у обычного ТЭЭЛ, что в конечном счете определяет особенности использования таких ус-

тройств. Достоинство подобных ТЭЭЛ — возможность иметь небольшое сопротивление ветвей.

ТЭЭЛ с тремя ветвями из константановой проволоки и омедненных участков описан в работе [13] применительно к высоковольтной термоэлектрической батарее. Преимущество такой батареи, по мнению авторов, в возможности значительного упрощения изготовления многоэлементной батареи, работающей, например, на сбросном тепле.

В термоэлементе с тремя ветвями одна часть ТЭЭЛ находится в режиме короткого замыкания, а другая — работает на полезную нагрузку. Таким образом, к. п. д. ТЭЭЛ в указанных выше схемах много меньше, чем в обычном ТЭЭЛ.

ТЭЭЛ с жидкими полупроводниками. Применение высокотемпературных ТЭЭЛ с жидкими полупроводниками имеет практическое значение, поскольку в этом случае можно использовать большие температурные перепады без нарушения в работе ТЭЭЛ из-за температурных деформаций ТЭМ.

ТЭЭЛ с жидким полупроводником, показанный на рис. 5.17, предложен и описан О. П. Астаховым [14]. Этот ТЭЭЛ состоит из внутренних 8 и наружных 2, 5 металлических (например, из молибдена) колец, а радиальный зазор между кольцами заполнен жидкими ТЭМ p -типа 4 или n -типа 1, обладающими хорошими термоэлектрическими характеристиками при рабочих температурах. Вытекание ТЭМ предотвращается пришлифованными керамическими шайбами 3 и 6. Теплоноситель проходит через полость 7, хладагент омывает кольца 2 и 5 и токоотводы 9.

Конечно, разработка конструкций ТЭЭЛ с жидкими полупроводниками находится в начальной стадии и пока не опубликованы данные о работе подобных ТЭГ. Это направление развития ТЭЭЛ открывает возможность значительного повышения температуры термоэлектрического цикла.

ТЭЭЛ с ядерным источником тепла. При использовании для ТЭГ ядерного источника тепла — тепловыделяющих элементов из урана (или плутония) или радиоактивных изотопов необходимо учитывать ряд специфических особенностей. Основной из них является возможность подвода тепла к горячему спаю ТЭЭЛ без промежуточного теплоносителя. Это открывает перспективу использования большого температурного перепада, вплоть до 2000°C , без усложнения конструкции установки.

Другая особенность — ионизирующее излучение (прежде всего нейтронное), которое вызывает изменение кристаллической решетки

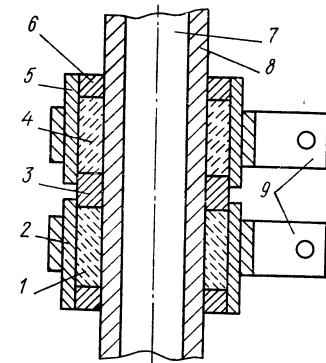


Рис. 5.17. Кольцевой ТЭЭЛ с жидким полупроводником.

материалов и создает возможность появления примесей в результате ядерных реакций, влияющих на изменение термоэлектрических свойств.

В настоящее время проблема создания ТЭЭЛ с ядерным источником тепла находится в стадии разработки. Имеются образцы ТЭЭЛ, показывающие возможность длительной работы при нагревании их в ядерном реакторе, например ТЭЭЛ установки «Ромашка», проработавшие более 15 000 ч (см. гл. 8).

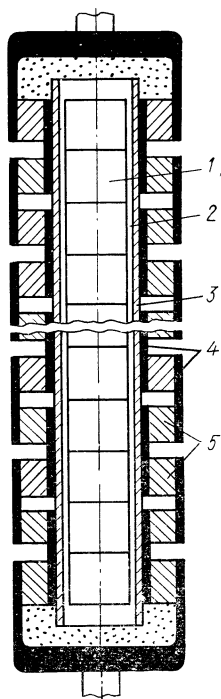


Рис. 5.18

Рис. 5.18. Реакторный ТЭЭЛ.

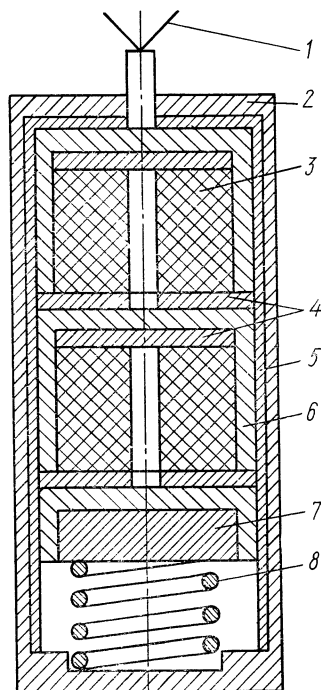


Рис. 5.19

Рис. 5.19. ТЭЭЛ из окиси урана и молибдена:

1 — токопровод; 2 — корпус из нержавеющей стали; 3 — таблетки из двуокиси урана; 4 — изоляция из Al_2O_3 ; 5 — трубки из Al_2O_3 ; 6 — молибденовая ветвь ТЭЭЛ; 7 — прижимная пластина; 8 — пружина из инконеля.

В США фирма «Вестингауз электрик корпорейшн» по контракту с Комиссией атомной энергии (КАЭ) США изучала возможность создания тепловыделяющего элемента с термоэлектрическим преобразованием энергии. В результате этих работ предложены конструкции ТЭЭЛ, одна из которых показана на рис. 5.18 [15].

Основа конструкции — тепловыделяющий элемент 1, состоящий из цилиндрических брикетов ядерного горючего, заложенных в об-

щий трубчатый корпус 2. Этот корпус по внешней стороне покрыт слоем электроизоляции 3, к которой примыкают коммутационные шины 4, соединенные с термоэлектрическими материалами n - и p -типа 5. Ветви соединены последовательно в батарею. Батареи можно последовательно соединять между собой и крепить на общей керамической плите.

Отвод тепла от наружной поверхности элементов предполагается высококипящей органической жидкостью (например, фенол, дифенил) либо газом (например, CO_2).

Изучались ТЭЭЛ, основанные на использовании ядерного горючего в качестве ветви ТЭЭЛ. В частности, были изготовлены ТЭЭЛ из слабообогатщенной двуокиси урана в паре с молибденом. Схематическая конструкция, содержащая по два ТЭЭЛ, показана на рис. 5.19 [16]. В ядерном реакторе такие блоки (по пять ТЭЭЛ в каждом) испытывались в течение двух недель при температуре UO_2 в центре таблеток до $2080^\circ C$ и на поверхности до $630^\circ C$. Опыт показал, что такие батареи могут работать внутри реактора. Однако надо исследовать другие реакторные материалы, так как добротность UO_2 мала, около $1 \cdot 10^{-6} (град)^{-1}$.

§ 5.2

Температурные поля и напряжения в ТЭЭЛ

Изменение температуры вдоль ветви ТЭЭЛ вызывает термические напряжения в материале. Термические напряжения обуславливаются также неравномерными температурными полями в местах подвода и отвода тепла, что может вызывать большие бесполезные потери температурного перепада. Тепловой поток в общем случае должен пройти по теплопроводу, через электрическую изоляцию, соединительные шины между ветвями ТЭЭЛ и многочисленные спаи и контакты между ними. Потери температурного градиента при этом могут достигать десятков градусов и заметно сказываться на к. п. д. ТЭЭЛ. Поэтому при создании новых моделей ТЭЭЛ, в особенности при наличии сложных теплопроводов, необходимо уделять большое внимание особенностям температурных полей.

Ниже приведены данные Е. А. Ганина, В. Ф. Лебедева и др. [17] исследования температурного поля безызоляционного ТЭГ, в котором тепло подводится и отводится с помощью неэлектропроводного теплоносителя. На рис. 5.20 показана схема такой батареи ТЭГ. Полупроводники n - и p -типов 3, 4 зажаты электродами 1 между горячими и холодными теплопроводами 2, 5, имеющими отверстия для протекания теплоносителя. В зависимости от размеров отверстий и расстояний между ними в большей или меньшей мере искажается температурное поле на границе полупроводник — теплопровод. Авторы нашли также зависимость, дающую возможность рассчитать распределение температур в такой конструкции термоэлектриче-

ской батареи. Расчеты проверялись на специальных макетах ТЭГ и дали удовлетворительное совпадение с экспериментом.

Аналитические зависимости для построения двумерного температурного поля ТЭЭЛ в стационарном режиме выведены М. Р. Привиним и А. Ф. Чудновским [18].

Исследуя этот круг вопросов Г. А. Варшавский и И. А. Резголь разработали систему связей, позволяющих рассчитывать оптимальные параметры ТЭГ: максимальную мощность, максимальный к. п. д., минимальный вес конструкций при изменяющейся температуре спаев ТЭЭЛ. В частности, авторы показали, что режим противотока обеспечивает более высокое значение входной мощности и к. п. д. ТЭГ, чем режим прямотока. При подводе тепла теплоносителем со значительным изменением его температуры необходимо учитывать температурные зависимости характеристик ТЭМ путем расчетов отдельных частей ТЭГ, отличающихся по температуре поверхностей приблизительно на 10°C [19].

Чаще всего ограничиваются исследованием тепловых полей в установившемся режиме работы ТЭГ. Однако во многих случаях важны переходные процессы при выводе ТЭГ на мощность, изменении режима и т. д.

Температурные поля в батареях ТЭЭЛ непосредственно связаны с температурными напряжениями, возникающими в результате неодинакового увеличения или уменьшения размеров деталей батарей ТЭЭЛ, образующих жесткую конструкцию. Такие термические напряжения приводят к появлению трещин, нарушению контактов и разрушению ТЭЭЛ. Эти явления во многом зависят от свойств ТЭМ.

Применение в ТЭЭЛ полупроводников существенно повысило требования к конструкциям ТЭГ, поскольку полупроводниковые материалы характеризуются хрупкостью, химической неустойчивостью и взаимодействием с материалами контактов.

Коэффициенты линейного расширения некоторых полупроводниковых материалов довольно значительны. Так, по данным Э. Ф. Косолаповой и Н. Г. Милевской, коэффициент линейного расширения PbTe около $17 \cdot 10^{-6} (\text{град})^{-1}$, ZnSb — $14 \cdot 10^{-6} (\text{град})^{-1}$ [20]. Для сравнения укажем, что коэффициент линейного расширения железа при 500°C около $14 \cdot 10^{-6}$, а меди $17 \cdot 10^{-6} (\text{град})^{-1}$.

Положим, что обычная батарея ТЭЭЛ состоит из n ТЭЭЛ с ветвями сечением $a \times a$ и длиной l . Тогда если γ — коэффициент линей-

ного расширения материала ветвей, то при переходе от холодного состояния к рабочему перепаду температур общая ширина горячих концов батареи станет больше ширины холодных концов на $\Sigma \Delta a = \gamma (T_r - T_x) n 2a$. Например, для ТЭМ с $\gamma = 2 \cdot 10^{-5} (\text{град})^{-1}$ при $T_r - T_x = 500^\circ\text{C}$, $a = 2 \text{ см}$ и батареи из $n = 50$ ТЭЭЛ увеличение ширины горячих концов батареи относительно холодных концов составит 2 см . Эти значительные температурные деформации, которые могут привести к разрушению батареи, вызывают необходимость принять меры для уменьшения их относительной величины, а именно: закрепление батареи в средней части ТЭЭЛ, введение гибких элементов на соединительных шинах и т. п.

Увеличение ширины ветви на нагретом конце ТЭЭЛ означает также изгиб батареи по некоторому радиусу $R = l / [\gamma (T_r - T_x)]$. Если длина ветви ТЭЭЛ $l = 0,5 \text{ см}$, то $R = 0,5 / (2 \cdot 10^{-5} \cdot 500) = 50 \text{ см}$.

Таким образом, для обеспечения длительной работы ТЭЭЛ необходимо принимать меры к устранению или максимальному уменьшению температурных напряжений. Хорошая компенсация температурных расширений — предпосылка создания работоспособного ТЭГ.

В какой-то мере эти трудности могут быть преодолены подбором подходящей конструктивной формы. Считают, например, что ТЭЭЛ большой высоты и малого сечения, допускающие относительно большое искривление их осей, более устойчивы к термическим напряжениям и к вызываемым ими дефектам.

ТЭЭЛ большой высоты и малого сечения имеют большое собственное омическое сопротивление, что уменьшает относительную роль контактных сопротивлений и таким образом повышает к. п. д. ТЭЭЛ. Однако применение таких ТЭЭЛ снижает удельную электрическую мощность на 1 см^3 ТЭМ, вызывая увеличение общего количества ТЭМ и поверхностей теплопровода. В частности, батареи ТЭЭЛ из теллуристого свинца, отличающегося хрупкостью и низкой механической прочностью, должны иметь свободную деформацию ветвей (применение пружинных контактов, гибкой коммутации и т. п.).

§ 5.3.

Контактные сопротивления

Введение. Соединение ветвей и частей ветвей ТЭЭЛ между собой всегда связано с дополнительным омическим сопротивлением, вызывающим прямые потери полезной мощности в виде тепла Джоуля.

Термоэлектрические генераторы состоят из большого количества ТЭЭЛ, соединенных последовательно или параллельно. Длина ТЭЭЛ колеблется обычно от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров, а их количество — от нескольких десятков до нескольких

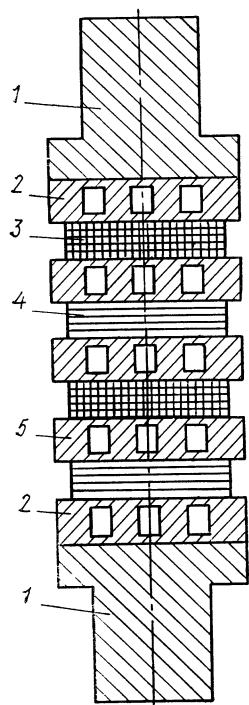


Рис. 5.20. Схема безызоляционного ТЭГ:

1 — токосъемы; 2 — холодные теплопроводы; 3 — ТЭМ n -типа; 4 — ТЭМ p -типа; 5 — горячий теплопровод.

тысяч штук. Таким образом, термоэлектрическая батарея является цепью из многочисленных контактных сопротивлений, которые отрицательно влияют на характеристики ТЭЭЛ.

При нагревании и охлаждении ТЭЭЛ его ветви, в особенности контактные слои, как указывалось выше, могут иметь большие градиенты температур, а следовательно, механические напряжения, вызывающие образование трещин, расслоение и другие повреждения ТЭМ. При этом может резко увеличиться электрическое сопротивление контактов и, таким образом, снизится мощность и к. п. д. ТЭЭЛ. Следует заметить, что эффективные ТЭМ часто очень хрупки, что осложняет создание ТЭЭЛ, устойчивых при длительной эксплуатации.

На горячем конце ТЭЭЛ имеет место диффузия разнородных материалов, которая приводит к изменению состава, ухудшению термоэлектрических свойств ТЭМ и сокращению срока работы ТЭЭЛ.

Коммутацию ТЭЭЛ в зависимости от особенностей ТЭМ и ТЭГ, и от срока службы осуществляют с помощью пайки, сварки, прессования, механического прижатия и жидких контактов. Контактное сопротивление может колебаться в широких пределах: $3—5000 \text{ мком} \cdot \text{см}^2$. Контактные сопротивления подробно изучались в работах [21, 22, 23].

Коммутация прессованием. Коммутация к введению в ТЭМ металлических шин, которые соединяются с ТЭМ горячим прессованием под давлением иногда в сотни килограммов на 1 см^2 .

Например, ТЭЭЛ на основе PbTe спрессовывают с железными шинами. Такие ТЭЭЛ успешно работают в инертной или восстановительной атмосфере с температурой на горячей стороне $500—600^\circ \text{C}$. Обычно сопротивления контактов возрастают после нескольких тысяч часов работы ТЭГ в результате циклического изменения температуры и нарушения герметичности конструкции, приводящих к окислению материалов контактов.

В работе А. Н. Воронина [24] указывается, что при изготовлении ТЭЭЛ из SbZn и константана соединение ветвей производилось методом запрессовки константановой проволоки или ленты в полупроводниковом материале с последующей сваркой константановых проволок. Еще более перспективным оказалось одновременное прессование большого количества ТЭЭЛ с законченной коммутацией.

У. А. Арифов и др. [25] изучали коммутацию ТЭЭЛ из $\text{Bi}_2\text{Te}_3—\text{Bi}_2\text{Se}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_3—\text{Sb}_2\text{Te}_3$ применительно к батарее ТЭЭЛ, работающей при температуре горячего спая 250°C и холодного спая 25°C . При этом сравнивалась горячая прессовка коммутационного материала из порошка $\text{NiBi} + \text{Ni}$ и пайка припоем из висмута и из Pb—Ag . Перед прессовкой под давлением $6,5 \text{ Т/см}^2$ при 360°C в течение 3 мин контактируемые поверхности очищали и обезжиривали.

Сопротивление прессованных поверхностей оказалось в 1,5—3 раза меньше, чем припаянных. Прессовка указанных ТЭМ оказалась лучшим способом коммутации горячих спаев.

Коммутация с помощью пайки, сварки, заливки жидким металлом. Такая коммутация широко используется в различных вариантах и сочетаниях, позволяя получать хорошие механические свойства и низкое сопротивление контактов, порядка $1—30 \cdot 10^{-5} \text{ ом} \cdot \text{см}^2$. ТЭЭЛ из SbZn и константана [48] изготавливались путем припайки константанового электрода к полупроводнику. В этом случае отдельно изготавливалась ветвь из SbZn в виде цилиндрического столбика. Константановая ветвь состояла из перемычки с чашками по концам, которые последовательно спаивались со столбиками. Чашки, надевавшиеся на концы столбиков из SbZn , обеспечивали хорошие условия для пайки и большую площадь контакта. Внутренняя часть чашек и концы столбиков предварительно лудили припоем из Sb и Sn , при этом слой полуды делался как можно более тонким (флюсом служил стearин). Пайка велась в приспособлении, создающем нагрев и обеспечивающем параллельность поверхностей. Когда коммутация осуществлялась пайкой галлием с индием, сопротивление оказывалось в пределах $50—150 \text{ мком} \cdot \text{см}^2$.

При коммутации ТЭЭЛ пайкой и сваркой (а также прессованием) любые изменения температуры сопровождаются термическими напряжениями в местах контактов материалов, имеющих различные коэффициенты линейного расширения. Эти напряжения приводят к появлению трещин, к расслоениям и другим нарушениям. В связи с этим важен правильный подбор контактирующих материалов по коэффициенту линейного расширения. В некоторых случаях возникает необходимость введения промежуточных слоев нейтральных материалов для уменьшения большой разницы в линейном расширении. Характеристики некоторых коммутационных материалов приведены в табл. 5.1.

В США запатентованы коммутационные сплавы для PbTe и AgSbTe—SnTe , для $\text{Bi}_2\text{Te}_3—\text{As}_2\text{Te}_3$, для InSb—GaSb . При этом в качестве тоководов рекомендуются Fe , Ni , сталь, Mo , Cr [26].

Возможность коммутации ТЭЭЛ путем диспергирования расплавленного металла струей воздуха описана Л. М. Драбкиным и др. [27]. Изучалась коммутация тройных сплавов на основе Sb , Te , Bi и Bi , Te , Se указанным способом, с нанесением трех слоев: никеля (толщиной 20 мкм), меди (толщиной $1; 1,5 \text{ мм}$), алюминия (толщиной $0,2 \text{ мм}$). Контактное сопротивление, измеренное на большом количестве образцов, было около $7 \cdot 10^{-4} \text{ ом} \cdot \text{см}^2$. После спекания в атмосфере водорода контактное сопротивление уменьшилось до $2 \cdot 10^{-4} \text{ ом} \cdot \text{см}^2$ при прочности сцепления $40—42 \text{ кг/см}^2$. Коммутация выдерживала без заметного изменения характеристик тепловые удары (при 280°C опускание в воду с температурой 20°C). Этот метод коммутации пригоден при любых размерах и любой форме поверхностей спаев. Для припайки контактируемых поверхностей к диэлектрикам рекомендуется металлизация диэлектриков. Указывается возможность металлизации окиси бериллия молибденом или никелем.

Таблица 5.1

Характеристики коммутационных материалов [23]

Материал	Температура плавления, °С	Температура коммутации, °С	Способ коммутации
BiSn (90% Bi)	160	200	Облуживание под флюсом (стеарин)
BiSb (5% Sb)	320	350—450	То же
BiSb (40% Sb)	430	—	»
InGa (85% Ga)	16,4	17	Облуживание при комнатной температуре
PbGe (2% Ge)	330	370	Облуживание под флюсом
Fe	1535	400—600	Прессовка
Ni	1453	500—600	Диффузионное сращивание
Mo	2625	900—1000	То же
W	3380	900—1000	»
WC	>3000	850—900	»
Графит	>3000	1100—1200	»
AgSb (89% Ag)	—	650	Пайка в атмосфере Ar или N
AgSb (81% Ag)	—	580	То же

Интересные выводы сделаны Г. А. Алатырцевым и др. [28] при изучении коммутации ТЭЭЛ, основанной на нанесении тонких металлических пленок гальваническим методом. Исследовалось гальваническое осаждение сплава вольфрам—кобальт на полупроводник. У образцов из теллурида германия с электропроводностью около $4000 \text{ (ом} \cdot \text{см)}^{-1}$ контактное сопротивление пленки из сплава вольфрама и кобальта составило при комнатной температуре около $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ ом} \cdot \text{см}^2$. После испытания этих образцов в аргоне при 600°C в течение 1000 ч контактные сопротивления практически не изменились. Таким образом, представляется перспективным применение гальванической металлизации для коммутации ТЭЭЛ. Эти же авторы изучали возможность снижения скорости диффузии коммутационных материалов за счет применения наплавки с температурой плавления около 1000°C , наносимых на полупроводниковые сплавы, например PbSe, с рабочей температурой 600°C . Были опробованы коммутационные сплавы из 35% Sn и 65% Ni, 35% Sn и 65% Fe и другие, имеющие температуру плавления $1075—1250^\circ \text{C}$. Образование диффузионного перехода между припоем и полупроводником достигалось кратковременным контактом расплавленного коммутационного материала с поверхностью полупроводника (процесс осуществлялся в восстановительной атмосфере). Опыт показал, что нагрев полупроводника до 500°C практически исключает рас-

трескивание. Измеренное переходное сопротивление границы наплавка—полупроводник оказалось ниже $10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}^2$. Такие наплавки могут устойчиво работать при температуре до $500—600^\circ \text{C}$, являясь буферным материалом коммутации, а основная коммутация может осуществляться с помощью твердых припоев.

В некоторых случаях применяют контакты из золота, осажденного электролитическим методом. Технология получения таких контактов описана в работе [29].

Примером высокотемпературной коммутации является кремний-германиевый ТЭЭЛ, показанный на рис. 5.21 и пригодный для работы до температур 400°C (холодный спай) и 1000°C (горячий спай).

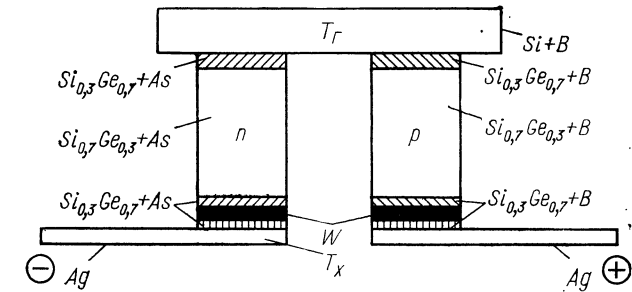


Рис. 5.21. Термоэлемент из SiGe с кремниевыми контактами.

Ветви состоят из сплава $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$, легированного бором (p-тип) и мышьяком (n-тип), и имеют размер $6 \times 6 \times 6 \text{ мм}$. Мощность одного ТЭЭЛ около 1 Вт [30]. В этом ТЭЭЛ на горячем спае применена шина из высоколегированного кремния $\text{Si} + \text{B}$ с подслоем из $\text{Si}_{0,3}\text{Ge}_{0,7} + \text{As}$, либо $\text{Si}_{0,3}\text{Ge}_{0,7} + \text{B}$. На холодном конце переход к тоководам из серебра осуществляется слоями вольфрама толщиной 1 мм с промежуточными слоями $\text{Si}_{0,3}\text{Ge}_{0,7} + \text{As}$ или $\text{Si}_{0,3}\text{Ge}_{0,7} + \text{B}$ толщиной 0,2 мм. Сварка ТЭЭЛ производилась в атомарном водороде при 1200°C с применением графитового держателя. Соединение готовых ТЭЭЛ осуществлялась серебряными шинами. Эти ТЭЭЛ имели при комнатной температуре ТЭДС и электропроводность соответственно для p-ветви 130 мкВ/град и $1000 \text{ (ом} \cdot \text{см)}^{-1}$ и для n-ветви 160 мкВ/град и $650 \text{ (ом} \cdot \text{см)}^{-1}$. При $T_g - T_x = 750^\circ \text{C}$ напряжение холостого хода 0,36 В, внутреннее сопротивление 0,02 ом. Лабораторные испытания с электронагревом при $T_g = 950^\circ \text{C}$ и $T_x = 350^\circ \text{C}$ в течение 10 недель на воздухе не дали изменения мощности. Испытания со снятием подогрева (800 раз) также не вызвали изменений мощности ТЭЭЛ.

Коммутация жидкометаллическим контактом. Использование электропроводящих жидкостей для создания надежных контактов в ТЭЭЛ перспективно, поскольку снимает проблему механических напряжений, однако при этом

увеличиваются коррозия и диффузия материалов. В табл. 5.2 указаны некоторые сплавы, пригодные для работы в жидком или полужидком состояниях.

Таблица 5.2

Припои для жидкометаллического контакта

Назначение материала	Вариант 1	Вариант 2
Для коммутающей шины	Ag, Cu, Pb	Pb, Pb—Bi
Для защитного подслоя на термоэлементах	Fe, Ni, Co	Fe
Легкоплавкий припой (30 вес. %)	Pb	Fe, Ni, Co, Cu, Ag
Наполнитель (70 вес. %)	Pb—Bi	Fe

Хорошие результаты дает использование в качестве жидкометаллического контактного слоя эвтектика индий—галлий (83 ат. % галлия) с температурой плавления $16,4^{\circ}\text{C}$, предложенная Е. К. Иорданишвили [31]. Эвтектика обладает хорошей адгезией по отношению ко многим ТЭМ, малым давлением паров и дает контактное сопротивление $5 \cdot 10^{-5} \text{ ом} \cdot \text{см}^2$. Однако вследствие ухудшения адгезии использование эвтектики при температурах более 300°C нецелесообразно.

Для снижения переходных электрических и тепловых сопротивлений контактов используется легкоплавкий припой из тонкодисперсной смеси и смачиваемого им наполнителя, имеющего температуру плавления выше рабочей температуры соединения. В табл. 5.2 указаны два варианта такого припоя.

С целью снижения величины переходного сопротивления в интервале температур от комнатной до 600°C и для исключения диффузии контактного материала в полупроводник (теллурид германия) Г. А. Алатырцев и др. [32] предложили наносить гальваническим методом слой сплава кобальт—вольфрам толщиной около 10 мкм .

Предложены также способы коммутации, основанные на применении медленно затвердевающих сплавов, таких, как сплавы галлия с медью, никелем, молибденом, что дает возможность исключить остаточные деформации и напряжения после изготовления и улучшить тепловой и электрический контакты. При перемешивании порошков этих металлов в галлии происходит их растворение и образование тугоплавких соединений, выпадающих в твердую фазу. Сплавы, содержащие 65% меди и 35% галлия, затвердевают при 25°C через 48 ч и пригодны для работы на воздухе при 250°C . Сплавы меди (50%), олова (18%) и галлия (32%) твердеют через 24 ч и пригодны для работы на воздухе до 700°C , имея коэффициент линейного расширения около $23 \cdot 10^{-6} (\text{град})^{-1}$. Предложены подобные же сплавы на основе галлия и меди с содержанием от 33 до 82% серебра [23].

Контакт соприкосновения под давлением пружин. Контакт имеет очевидные преимущества (отсутствие термических напряжений, удобство монтажа и демонтажа и др.). Такие контакты широко используют в ТЭГ малой мощности, где к. п. д. системы не имеет решающего значения. Недостаток такого контакта — большие омическое и термическое сопротивления, что может приводить к заметному уменьшению электрической мощности и потерям температурного перепада до 20% и более.

В отличие от хорошо изученных в электротехнике прижимных контактов обычных шин и проводов при комнатных температурах,

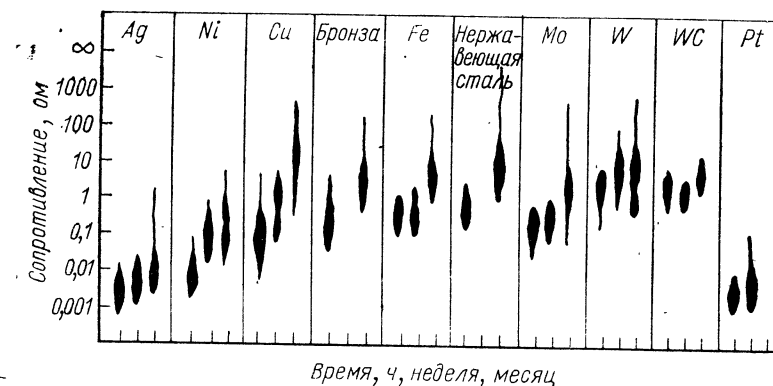


Рис. 5.22. Контактные сопротивления при усилии 100 Г.

контакты ТЭЭЛ работают при высоких температурах, и потери напряжения в одном контакте должны быть не выше сотых долей вольта. Чистота обработки и нагрузка на поверхность прижимного контакта оказывают значительное влияние на величину контактного сопротивления, между тем коррозия нагретого контакта может свести к нулю усилия по созданию чистой поверхности.

На рис. 5.22 приведены экспериментальные значения сопротивлений прижимных контактов некоторых металлов. Измерения контактных сопротивлений проводились при комнатной температуре, указанные металлы находились в контакте с золотом и прижимались с усилием 100 Г.

Для большинства металлов сопротивление контакта измерялось три раза с интервалами 2 ч, неделя и 6 месяцев после зачистки контакта. Сопротивлению контакта соответствует максимальная толщина линий на рисунке.

Прижимные контакты изучались Н. И. Эрзиным и Н. В. Маковым [22]. Ветви ТЭЭЛ из теллуристого свинца прижимались давлением около 7 кг/см^2 к шинам из железа и из низколегированных сталей в восстановительной и инертной средах. Наблюдалось сопротивление контактов около $10^{-5} \text{ ом} \cdot \text{см}^2$. При 705°C не наблюдалось заметной диффузии коммутационного материала в ТЭМ.

§ 5.4.

Электрическая изоляция батареи ТЭЭЛ

Во многих случаях подвод и отвод тепла от ТЭЭЛ осуществляется материалами, хорошо проводящими тепло и электричество. Поэтому между ТЭЭЛ и этими материалами приходится вводить электроизоляцию (слюда, окисные пленки и т. п.).

При последовательном соединении большого количества ТЭЭЛ в батарею разность потенциалов на зажимах батареи будет возрастать, а сопротивление изоляции между ТЭЭЛ и теплопроводом остается постоянным, что может привести к значительным утечкам тока через изоляцию, а следовательно, к снижению к. п. д.

А. Х. Черкасский [33] показал, что в батарее с электропроводящим теплопроводом увеличение числа ТЭЭЛ имеет определенный предел, выше которого мощность батареи остается постоянной. Таким образом, вследствие проводимости теплоконтактных изоляторов батарея ТЭЭЛ эффективна лишь при низком напряжении (6—60 в). Для уменьшения потерь энергии по этой причине сопротивление изоляции на один элемент должно быть значительно больше внутреннего сопротивления ТЭЭЛ и возрастать при последовательном соединении ТЭЭЛ.

Как указывается в работе [34], для получения большого напряжения на зажимах ТЭГ необходимы хорошие изоляционные материалы, разделение ТЭГ на блоки с отдельным теплоподводом, оптимизация количества ТЭЭЛ в блоке и другие меры.

В качестве материала для электрической изоляции ТЭГ при температурах до 400—500° С может служить слюда толщиной 0,02—0,04 мм. Слюда в зависимости от сорта имеет удельный вес 2,5—3,2 г/см³, электрическую прочность 60—200 кВ/мм, объемное электрическое сопротивление 10¹³—10¹⁵ ом·см³ (при 20° С), теплостойкость 500—900° С, коэффициент теплопроводности 0,0026—0,0030 вт/(см·град). Можно надеяться на использование в будущем синтетической слюды, созданной в последние годы во Всесоюзном научно-исследовательском институте синтеза минерального сырья, с лучшими характеристиками, чем у природной слюды. Обычные лаки и эпоксидные смолы пригодны в качестве изоляции для ТЭЭЛ, работающих при низких температурах, 100—200° С. Пластины и пленки из окиси бериллия, алюминия, циркония и некоторых других окислов можно использовать для высокотемпературных ТЭЭЛ. Характеристики этих материалов приведены в работах [35—37].

В некоторых случаях для изготовления высоковольтных ТЭГ используются тонкопленочные ТЭМ, которые наносятся тем или иным способом прямо на изоляционный материал (подложку). Подложка должна выдерживать рабочую температуру, иметь коэффициент расширения, соответствующий коэффициенту расширения ТЭМ, обладать достаточно большим электрическим сопротивлением,

быть химически стойкой, в соответствующих случаях теплопроводной, не содержать примесей (например, щелочей), способных воздействовать на ТЭМ.

В табл. 5.3 приведены свойства некоторых материалов подложек.

Таблица 5.3

Свойства некоторых изоляционных материалов [38]

Изоляционный материал	Размягчение, °С	Коэффициент расширения, 10 ⁻⁶ (°С) ⁻¹	Коэффициент теплопроводности, ккал/(см·сек·°С) (при 25° С)	Логарифм объемного электросопротивления, ом·см ³ (при 250° С)
Натровая известь	696	9,2	0,0023	6,4
Щелочные цинкоборосиликаты	720	7,2	0,003	8,3
Бесщелочные кальций-алюминосиликаты	1060	3,5	—	13,6
90% SiO ₂	1500	0,8	0,0038	9,7
Плавленый кварц	1580	0,56	0,0034	11,8
85% Al ₂ O ₃	1100	6,5	0,06	10,7
94% Al ₂ O ₃ + CaO + SiO ₂	1500	6,2	0,073	12,8
96% Al ₂ O ₃ + MgO + SiO ₂	1550	6,4	0,084	10,0
98% BeO	1600	6,1	0,5	13,8
99,5% BeO	1600	6,0	0,55	14,0

§ 5.5

Старение и сублимация ТЭЭЛ

Под старением ТЭЭЛ следует понимать ухудшение их термоэлектрических характеристик с течением времени, определяющее возможный срок службы ТЭГ. Как показали Б. И. Болтакс и др. [39], основными факторами, способствующими старению ТЭЭЛ, являются диффузия примесей из коммутирующих материалов, термодиффузия, возникающая при наличии градиента температур в ТЭЭЛ, электролитический перенос веществ, возникающий из-за дрейфа ионов в электрическом поле ТЭЭЛ. Кроме объемных явлений может иметь место миграция частиц по свободной поверхности ветвей ТЭЭЛ.

С помощью меченых атомов и другими способами были исследованы случаи диффузии в SbZn, PbTe, SbSe, Ti₂Te₃, Bi₂Te₃ + Bi₂Se₃, Bi₂Te₃ + Sb₂Te₃ и др. В некоторых опытах наблюдалось перераспределение примесей, например, серебра, уже через несколько часов. Однако введение некоторых добавок, например TeI₄, приводило к прекращению перераспределения примесей. Один из способов управления диффузией примесей — введение третьей компоненты. Но это может привести к изменению термо-

электрических параметров ТЭМ. Скорость старения ТЭЭЛ при рабочих температурах зависит также от разрушения его электрических контактов, что характеризуется ухудшением или даже потерей электрической проводимости. В литературе приводятся результаты измерения сопротивления контактов теллуристого свинца с нержавеющей сталью и сплавом хастеллой-25. В экспериментах использовались паяные и прессованные контакты. На рис. 5.23 показаны кривые зависимости полного электрического сопротивления ТЭЭЛ от времени работы как для прессованных, так и для

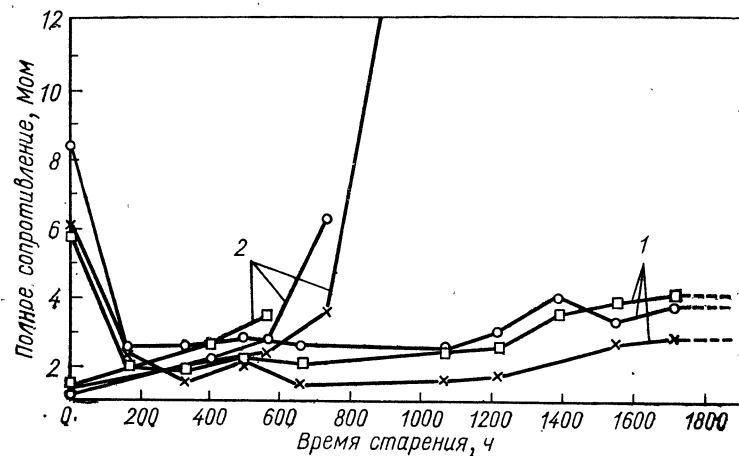


Рис. 5.23. Кривые старения контактов элементов p -типа с шинами из хастеллой-25:
1 — прессованные шины; 2 — паяные контакты.

паяных контактов с хастеллой-25. Паяные контакты имеют меньшее начальное сопротивление, но через 500—1000 ч выходят из строя (возрастание сопротивления). Прессованные контакты работали более 1700 ч, но имели вначале более высокое сопротивление, которое постепенно падало до уровня паяных образцов.

Следует заметить, что добавление в теллуристый свинец олова снижает срок службы коммутационных соединений иногда до 200—300 ч. Применение в качестве контактных шин чистого железа снижает начальный рост сопротивления прессованных образцов до уровня паяных.

Как показали А. Н. Воронин и др. [40], сплав $\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Bi}_2\text{Se}_3$ с добавками висмута и меди со временем существенно менял свои свойства. В образцах холодного прессования размером $20 \times 5 \times 5$ мм через два месяца электропроводность снижалась на 30%, а ТЭДС увеличивалась на 18% в результате окисления. В этом случае было использовано восстановление окислов, осуществляв-

шееся в течение 15—20 мин при $150\text{—}200^\circ\text{C}$. После восстановления образцы, покрытые пленкой восстановителя, например, парафина, битума с парафином, битума, канифоли с парафином и др., в дальнейшем мало меняют свои электрические свойства. Такие ТЭЭЛ стареют в среднем на 10% в год.

В табл. 5.4 приведены результаты испытаний батареи из 18 ТЭЭЛ, изготовленных на основе Bi_2Te_3 .

Таблица 5.4

Зависимость срока службы ТЭЭЛ на основе Bi_2Te_3 от температуры

Температура горячего спая, $^\circ\text{C}$	Срок службы, ч	Начальная мощность, вт
250	200	2
200	4000	1,6
150	Более 6000	1,0

Значительное уменьшение срока службы с повышением рабочей температуры данного сплава иллюстрирует необходимость принятия мер по уменьшению старения.

При коммутации термобатарей медными шинами горячая медь может диффундировать в полупроводники, изменяя относительное содержание легирующих примесей и таким образом ухудшая характеристики ТЭМ.

Следует особо отметить опасность сублимации некоторых ТЭМ, особенно при работе в вакууме. Переход твердых ТЭМ в газообразное состояние, минуя жидкое, приводит к разрушению ТЭЭЛ и образованию электропроводящих перемычек, вызывающих понижение напряжения, мощности и к. п. д. ТЭГ. Эти перемычки образуются в результате осаждения паров вещества на холодных спаях и других деталях. В особенности это явление опасно в ТЭГ, предназначенных для длительной работы (в течение нескольких тысяч часов). К таким материалам с повышенным давлением паров относятся PbTe , PbSe , GeTe . Иногда при длительной работе возгоняются легирующие примеси, даже такие, как В, Ga, Р. Поэтому в каждом случае должна быть оценена сублимация ТЭЭЛ.

В качестве защиты от сублимации помимо подбора соответствующих ТЭМ используют защитные обмазки и покрытия, обеспечивающие вакуумную плотность, а также другие методы герметизации ТЭЭЛ.

Давление паров ТЭМ, характеризующее летучесть Bi_2Te_3 , GeTe , PbTe и других материалов, изучалось А. С. Пашинкиным, А. В. Новоселовой и др. [41].

§ 5.6

Удельная мощность ТЭЭЛ

Объем и вес термоэлектрической батареи существенно зависят от плотности теплового потока через термоэлементы. Чем большее количество тепла подается на 1 см^2 горячего спая и снимается с холодного спая, тем меньше размер и вес батареи при данной мощности.

Если условно принять высоту ТЭЭЛ по ТЭМ $0,5 \text{ см}$, то можно, как указывает Е. К. Иорданишвили, приближенно оценить мощность на 1 см^2 суммарного сечения ветвей ТЭЭЛ и на 1 кг веса ТЭМ.

Ниже приведены значения удельной мощности для некоторых термоэлектрических материалов.

Термоэлектрический сплав	Удельная мощность, кВт/кг
Тройные сплавы на основе Bi, Te, Sb, Se	0,35—0,6
Теллуристый свинец	0,2—0,25
Сплав кремния с германием	1,2

Следует иметь в виду, что удельные мощности, указанные выше, относятся к самим ТЭМ, вне связи их с остальными элементами конструкции ТЭЭЛ.

Как было указано в гл. 3, мощность, развиваемая термопарой, не зависит от объема ее ветвей, если невелики контактные сопротивления. Например, термопара с длиной ветви 100 мм и сечением 100 мм^2 при отсутствии контактных сопротивлений могла бы быть заменена термоэлементом длиной 1 мм , сечением 1 мм^2 , т. е. осуществлена с затратой в 10^4 раз меньшего количества ТЭМ. В реальных термоэлементах размеры ветви ограничиваются электрическим сопротивлением контактов, подводом и отводом тепла и потерями температурного градиента в контакте. Это влияние особенно заметно для термоэлементов с большой теплопроводностью материала ветвей.

Потеря электрической мощности в контакте может сильно влиять на общую эффективность термобатареи [42]. Пусть энергетические потери в контакте составляют $Q_K = I^2 (C/S)$, где C/S — сопротивление контакта, $\text{ом} \cdot \text{см}^2$. Это тепло уменьшает количество энергии, подводимой к горячему концу термопары, и увеличивает количество тепла, отводимого от холодного конца. С учетом этих потерь полезная электрическая мощность составит

$$W' = 2 \left\{ \alpha I (T_r - T_x) - I^2 \rho (l/S) - I^2 \left[\frac{C_r + C_x}{S} \right] \right\},$$

где C_r и C_x — соответственно омическое сопротивление горячего и холодного контактов и S — площадь контакта. Электрические потери в контактах особенно заметно влияют на к. п. д. термоэлемента, если собственное сопротивление последнего мало и потери в контакте составляют значительную долю величины омического сопротивления термоэлемента.

Для получения максимальной мощности на единицу веса (с учетом контактных сопротивлений) можно оценить оптимальную длину термоэлемента для заданного отношения l/s и значений C_r и C_x . Для этой цели указанное выше уравнение надо выразить через функцию мощности на единицу веса материала и приравнять к нулю производную по объему термоэлемента.

Длина ветви l_0 , обеспечивающая максимальную мощность на единицу веса термоэлектрика, выразится так

$$l_0 = 3 [I (l/s) (C_r + C_x)]/2 [\alpha (T_r - T_x) - I \rho (l/s)].$$

Возможность значительного уменьшения объема ветвей ТЭЭЛ исследовалась в работе [42].

Важная особенность ТЭЭЛ — независимость их мощности (по крайней мере принципиальная) от размеров ветвей — расширяет возможности использования ТЭГ при создании компактных конструкций и экономии термоэлектриков. Однако применение миниатюрных ТЭЭЛ осложняется сопротивлением контактов, подводом тепла и требует специальной разработки.

К попыткам использования миниатюрных ТЭЭЛ относятся разработки японских авторов [43]. Так, запатентован ТЭГ из 138 ТЭЭЛ размером $8 \times 27 \times 2,5 \text{ мм}$. Объем ТЭЭЛ из висмута, сурьмы и теллура 2 мм^3 ($1 \times 1 \times 2 \text{ мм}$), ТЭДС $220\text{—}230 \cdot 10^{-6} \text{ в/град}$. Для улучшения теплоотдачи, помимо теплового излучения, предусматривается охлаждение испаряющейся жидкостью.

§ 5.7

Надежность работы батареи ТЭЭЛ

Надежность работы ТЭГ оценивается как вероятность безаварийной работы установки в течение определенного времени, например ее срока службы. При оценке пригодности и перспективности, особенно автономной термоэлектрической установки, надежность играет первостепенную роль, поскольку выход из строя автономной морской или космической энергоустановки может иметь серьезные последствия.

Как известно, наука о надежности работы установок сложилась в результате использования в промышленной практике многоэлементных систем, например, электронных систем самолетов, вычислительных машин, судовых систем, включающих сотни тысяч отдельных элементов [44]. Термоэлектрические генераторы содержат обычно сотни и тысячи ТЭЭЛ и еще большее количество спаев и соединений, каждый из которых может быть причиной нарушения работы ТЭГ. Поэтому работа ТЭГ должна оцениваться с точки зрения надежности в эксплуатации [45].

Необходимая надежность работы установок обеспечивается мероприятиями, предусмотренными в процессе разработки, изготовления, монтажа и испытания элементов и установки в целом.

Надежность зависит от качества изготовления деталей и узлов, сборки и монтажа, а также условий испытания готовой продукции. В эксплуатации надежность обеспечивается соблюдением технологических режимов, соответствующим профилактическим ремонтом и соответствующей квалификацией обслуживающего персонала.

Оценка вероятности исправной работы установки в течение заданного времени производится на основе характеристик ТЭЭЛ и других элементов конструкции ТЭГ, от которых зависит надежность.

Одним из важных вопросов конструирования ТЭГ является выбор способа (последовательного и параллельного) соединения ТЭЭЛ

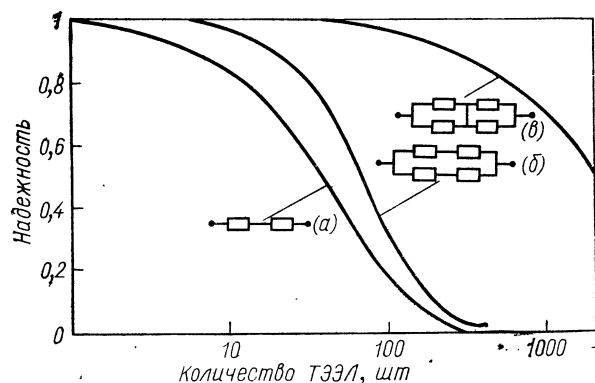


Рис. 5.24. Надежность цепи ТЭЭЛ при последовательном (а), параллельно-последовательном (б) и последовательно-параллельном (в) соединениях в случае надежности каждого ТЭЭЛ 0,98.

в батареи. При последовательном соединении ТЭЭЛ меньший ток позволяет использовать соединительные шины меньшего сечения. Однако в этом случае разрушение одного ТЭЭЛ или просто разрыв цепи в каком-либо спаяе или контакте вызывает прекращение работы всего ТЭГ. При параллельном соединении ТЭЭЛ выход из строя одного из нескольких ТЭЭЛ ведет к снижению мощности ТЭГ.

Надежность цепи последовательно соединенных ТЭЭЛ равна произведению надежностей отдельных элементов. Если число параллельно включенных ТЭЭЛ n , то такое резервирование увеличивает надежность в 2^n раз по сравнению с блоком без резервирования [45]. Поэтому для различных сочетаний ТЭЭЛ в ТЭГ получаются различные коэффициенты надежности работы установки. В работе [46] рассматривались последовательное, параллельное, параллельно-последовательное и последовательно-параллельное соединения ТЭЭЛ в батарею. На рис. 5.24 показана зависимость надежности от количества ТЭЭЛ при надежности каждого ТЭЭЛ, равной 0,98.

Как видно из рисунка, наибольшая надежность соответствует последовательно-параллельному соединению ТЭЭЛ.

Обеспечение надежности работы ТЭГ является сложной конструкторской задачей.

ГЛАВА 6

ТЭГ НА ХИМИЧЕСКОМ (ОРГАНИЧЕСКОМ) ТОПЛИВЕ, СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ И НЕКОТОРЫХ ДРУГИХ ИСТОЧНИКАХ ТЕПЛА

§ 6.1

Общая часть

Важным моментом, определяющим многие особенности установок ТЭГ, является выбор источника тепла (или типа топлива). Источник тепла определяет конструкцию, а часто и сферу применения термоэлектрических установок. Так, использование атомной энергии (ядерных реакторов) связано с дорогостоящей начальной загрузкой ядерного горючего, тяжелой защитой от излучений, но эти источники тепла (а также радиоактивные изотопы) могут работать в космосе и под водой.

Мощность радиоизотопных тепловых блоков понижается с течением времени и не поддается непосредственному регулированию; кроме того, требуется защита от излучений. ТЭГ на распространенном твердом органическом топливе (уголь, дрова) нуждаются в дополнительном обслуживании для удаления золы и загрузки топлива.

Жидкое топливо (керосин, мазут) значительно удобнее, так как не имеет этих недостатков твердого топлива. Еще удобнее работать с газообразным топливом. Использование ТЭГ на солнечной энергии связано с получением электроэнергии главным образом в дневное время и то не во всех районах Земного шара.

Низкопотенциальные источники тепла (горячая вода и т. п.) пригодны для ТЭГ с очень низким к. п. д. и малой удельной мощностью.

В настоящее время наибольшее развитие получили термоэлектрические генераторы на химическом топливе — керосине, бензине, горючих газах и т. п. Еще в конце пятидесятих годов десятки тысяч таких ТЭГ серийно выпускались в Советском Союзе и в других странах. Но приоритет в развитии теории и промышленного производства ТЭГ на химическом топливе принадлежит СССР [1].

Эти термоэлектрические генераторы, обычно мощностью до 0,1—1 *квт* (редко больше) использовались для питания радиоприемников и радиопередатчиков в установках катодной защиты трубопроводов, для подпитки батарей телефонных линий и т. д., а также в военном деле.

§ 6.2

ТЭГ на твердом топливе

Введение. Еще в 1940—1941 гг. изучение полупроводников в Ленинградском физико-техническом институте АН СССР достигло такого уровня, что оказалось возможным создание первого полупроводникового ТЭЭЛ. Однако дальнейшие работы по внедрению в полупромышленное производство таких ТЭГ в связи с войной были отложены. Вместе с тем, для выполнения насущных задач военного времени оказалось необходимым разработать ТЭГ для питания радиопередатчиков малой мощности. Первые в мире ТЭГ

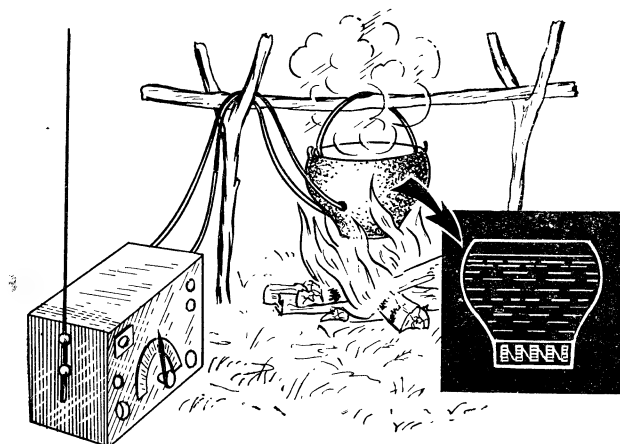


Рис. 6.1. ТЭГ-1 («партизанский котелок»).

на полупроводниках появились в СССР во время Великой Отечественной войны. Они получили название «партизанский котелок» [2].

ТЭГ типа ТГ-1. На рис. 6.1 показана идея термоэлектрического генератора ТГ-1 так называемого партизанского котелка. Схема конструкции ТГ-1 весьма проста. Несколько десятков ТЭЭЛ из SbZn и константана монтировали в дне специального сосуда, который наполняли водой и ставили на костер. Кипящая вода определяла температуру холодных спаев ТЭЭЛ, а более горячее (250—300° С) дно котелка определяло температуру горячих спаев. Мощность такого электрогенератора была невелика, а к. п. д. собственно ТЭЭЛ до 1,5—2%, но все же этого было достаточно для питания, например, маленькой армейской радиостанции «Север» [3].

ТЭГ на древесном угле. В 1945 г. научно-исследовательские организации СССР начали разработки по созданию ТЭГ как автономных источников постоянного тока для питания

радиоприемников в неэлектрифицированных районах. Тогда, как указывает один из участников работ А. Н. Воронин, были созданы ТЭГ, работающие на древесном угле и охлаждаемые водой или воздухом. На рис. 6.2 и 6.3 показаны конструктивные схемы этих ТЭГ. Их основные характеристики указаны в табл. 6.1.

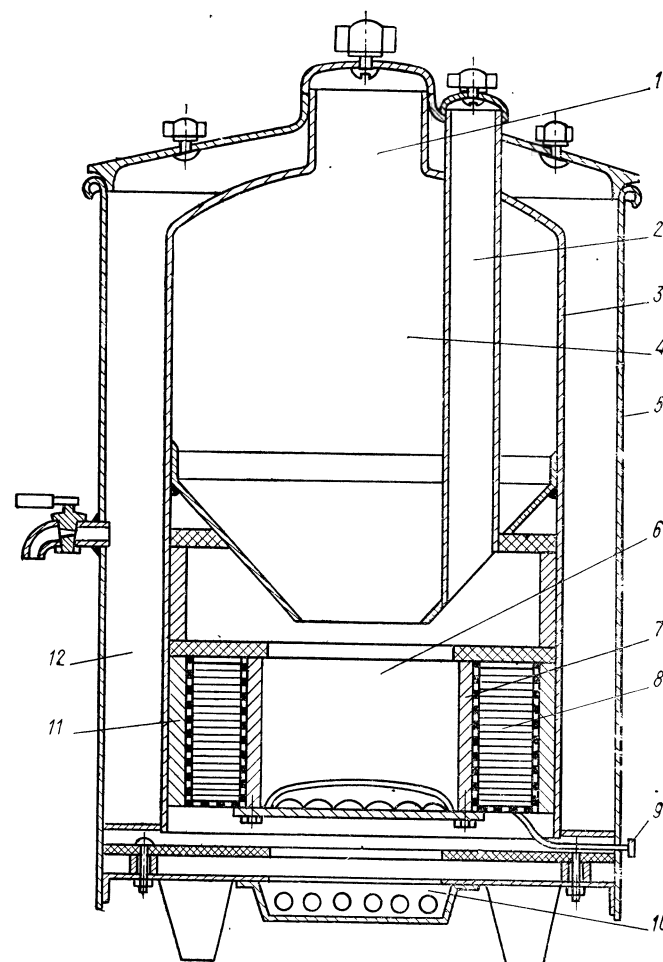


Рис. 6.2. ТЭГ с водяным охлаждением:

1 — горловина бункера; 2 — дымовая труба; 3 — внутренний кожух; 4 — бункер для топлива; 5 — наружный кожух; 6 — топка; 7 — чугунный корпус топки; 8 — ТЭЭЛ; 9 — вывод тока; 10 — зольник; 11 — чугунный коллектор охлаждения; 12 — кольцевая полость для воды.

ТЭГ с нагревом горячих спаев за счет сжигания древесного угля и охлаждением холодных спаев кипящей водой (см. рис. 6.2) имеет чугунную топку 6, в которой происходит горение угля, загружае-

мого в бункер 4 через горловину 1. Продукты сгорания уходят через трубу 2. В пространстве между внутренним кожухом 3 и наружным кожухом 5 находится кипящая вода, которая поддерживает температуру холодных спаев ТЭЭЛ около 100° С. Термoeлементы 8

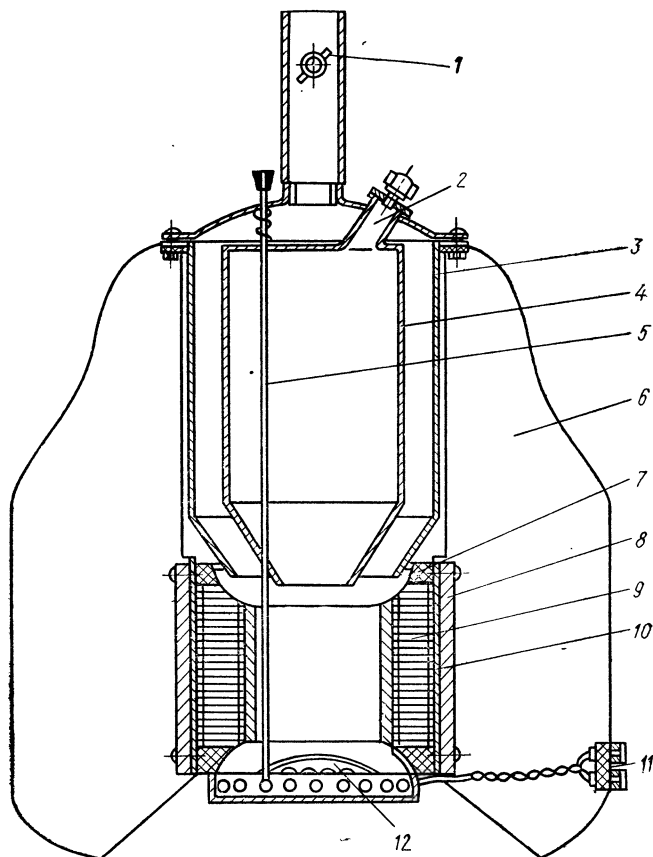


Рис. 6.3. ТЭГ с воздушным охлаждением:

1 — заслонка в дымовой трубе; 2 — люк для заправки топлива; 3 — наружный кожух бункера; 4 — стержень для рыхления топлива; 5 — внутренний кожух бункера; 6 — ребро воздушного охлаждения; 7 — уплотнение между бункером и топкой; 8 — коллектор охлаждения ТЭЭЛ; 9 — ТЭЭЛ; 10 — холодный контактный слой; 11 — вывод тока; 12 — низ топки (зольник).

электрически изолированы от конструкции установки тонкими слоями слюды. Тепловой контакт между кожухом 3 и ТЭЭЛ осуществляется легкоплавким сплавом, залитым между ними.

В ТЭГ имеются две независимо работающие батареи ТЭЭЛ: одна для питания цепей накала, другая — для питания (с помощью вибропреобразователя) анодных и сеточных цепей. Недостатки такого ТЭЭЛ: сложность осуществления теплового контакта между

Таблица 6.1

Характеристики ТЭГ на древесном угле [4]

Характеристика	Генератор с водяным охлаждением (см. рис. 6.2)	Генератор с воздушным охлаждением (см. рис. 6.3)
Мощность электрическая, <i>вт</i>	4	До 4
К. п. д. ТЭЭЛ, %	До 3,5	Около 2,5
ТЭМ:		
<i>n</i> -ветвь	PbS	Константан
<i>p</i> -ветвь	SbZn + BiSn	SbZn + BiSn
Топливо	Древесный уголь	Древесный уголь
Охлаждение	Кипящая вода	Воздушное
Срок службы, <i>ч</i>	—	4000—5000

ТЭЭЛ и холодильником, наличие кипящей воды и трудность управления угольной топкой.

В связи с этими недостатками был создан ТЭГ на угле с воздушным охлаждением (см. рис. 6.3). Здесь охлаждение спаев ТЭЭЛ осуществляется ребрами радиатора, прижатыми через свинцовую прокладку к блоку из ТЭЭЛ. Другие узлы конструкции этого ТЭГ — лишь некоторое усовершенствование узлов ТЭГ с охлаждением кипящей водой. Для обеспечения стабилизации сжигания угля применена автоматическая заслонка, приводимая в действие биметаллической спиралью. Использование в ТЭЭЛ константана создало возможность улучшить коммутацию и получить блоки из нескольких скоммутированных ТЭЭЛ. Применение указанных ТЭМ и новой технологии изготовления ТЭЭЛ дало возможность увеличить срок службы ТЭГ.

ТЭГ на дровах и угле. Дальнейшее развитие ТЭГ на твердом топливе привело к созданию еще нескольких моделей более крупных ТЭГ мощностью до 500 *вт* и более. Эти агрегаты представляли собой печи, использующие уголь или дрова, с термобатареями, вмонтированными в стенки [3].

В качестве примера приведем генераторы, разработанные для Дальнего Севера на 200 и 500 *вт*, работающие на любом топливе — дровах, угле, нефти. Генератор мощностью 200 *вт* потреблял около 2 кг дров за 1 ч.

Институт полупроводников АН СССР совместно со Всесоюзной ордена Ленина Академией сельскохозяйственных наук имени В. И. Ленина (ВАСХНИЛ) разработали для сельского хозяйства ТЭГ на дровяном топливе мощностью 1 *квт*. Он предназначался для получения электроэнергии, горячей воды или пара, используемых в животноводстве [5]. Однако работа ТЭГ на угле неустойчива из-за трудностей обеспечения равномерной подачи топлива. Очередной пуск ТЭГ требовал предварительной чистки топки, выход на мощность занимал много времени и т. п. Поэтому дальней-

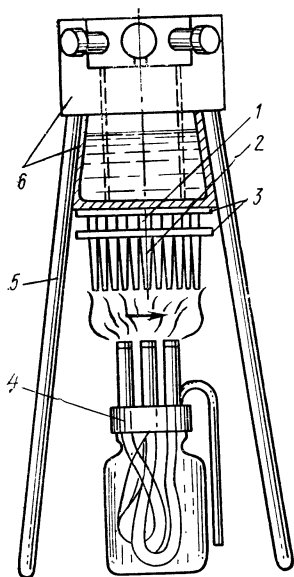


Рис. 6.4. Схема ТЭГ по американскому патенту:
1 — холодные концы ТЭЭЛ; 2 — горячие концы ТЭЭЛ; 3 — изоляционные диски из фибerglassа; 4 — спиртовая лампа; 5 — стойка треножника; 6 — корпус из бакелита.

Промежуточные ТЭГ на твердом и жидком топливе. Преимущества жидкого топлива вызвали появление промежуточных конструкций, пригодных для работы как на жидком, так и на твердом топливе. К таким конструкциям относится показанная на рис. 6.4 схема установки ТЭГ по американскому патенту 1961 г. Здесь 145 термоэлектрических элементов из проволоки диаметром 0,5 мм заделаны холодными концами в дно бакелитового стакана диаметром 5 см, поддерживаемого треножником. Горячие концы элементов нагреваются пламенем обычной спиртовой горелки. Одна ветвь ТЭЭЛ из константана, другая — из сплава никеля (91%) с молибденом (9%). Выходное напряжение генератора 6 в. Эта схема очень напоминает схему ТЭГ-1, но в другом конструктивном исполнении: с металлическими ТЭЭЛ и заменой костра спиртовой горелкой.

§ 6.3

ТЭГ на жидком топливе

ТЭГ на керосине типа ТГК-1, ТГК-3 и ТГК-2-2. ТЭГ на керосине основаны на применении в качестве источника тепла обычных осветительных керосиновых ламп и наряду с получением электроэнергии являются источниками света. С 1953 г. промышленность СССР начала массовый выпуск генераторов типа ТГК-3 [5]. Конструктивные схемы ТГК-1, ТГК-3 и ТГК-2-2 одинаковы: раскаленные продукты сгорания керосина нагревают горячие спай ТЭЭЛ из SbZn и константана, холодные спай имеют ребра воздушного охлаждения. Мощность ТГК-1 около 1,6 Вт, ТГК-3 около 3 Вт. Основные характеристики ТГК-3 указаны в работе [6]:

Мощность, Вт	3
Топливо	Керосин
Расход топлива, г/ч	70
ТЭМ:	
р-ветвь	Sb Zn
п-ветвь	Константан
Температура спаев, °С:	
горячий	380
холодный	80
Общий к. п. д., не выделяя затрат керосина на освещение, %	
0,4	
Напряжение (в) и ток (а) батарей:	
1-я батарея	2, 1
2-я батарея	2, 0,54
Вес всей установки, кг	8
Емкость резервуара для керосина, л	0,8
Срок службы ТЭЭЛ в рабочих условиях, ч	4000—4500

На рис. 6.5 показана конструкция ТЭГ ТГК-1. Источником тепла является 10-линейная плоскофитильная керосиновая лампа, часть стекла в которой заменена трубой из силумина, к которой

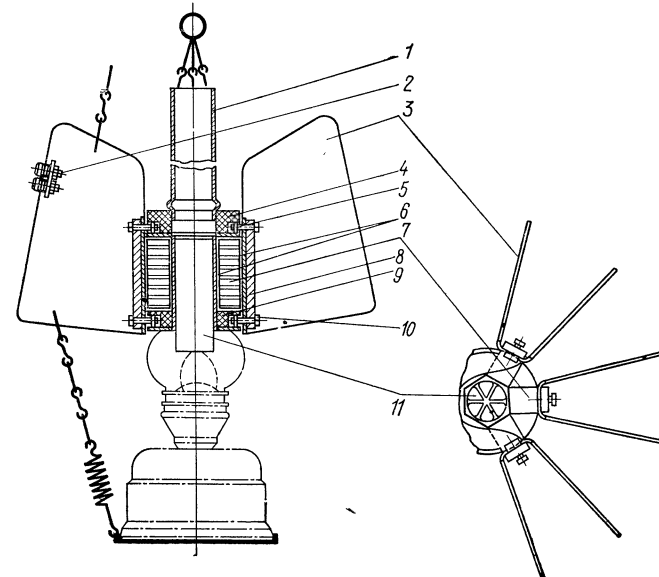


Рис. 6.5. Схема ТЭГ типа ТГК-1:

1 — труба для вывода продуктов сгорания; 2 — выводы тока; 3 — ребро воздушного охлаждения; 4 — уплотнение; 5 — стяжные кольца; 6 — изоляция из слюды; 7 — ТЭЭЛ; 8 — прижимная планка; 9 — теплоизоляция; 10 — стяжной болт; 11 — труба с внутренними ребрами (горячий коллектор).

прижимаются ТЭЭЛ. Силуминовая труба, от которой нагреваются ТЭЭЛ, имеет внутренние перегородки (ребра), служащие для увеличения поверхности, омываемой горячими газами. Блоки термоэлементов расположены вертикально, по шести граням силуминовой трубки. Охлаждение ТЭЭЛ осуществляется воздухом с помощью

ребер, которые прижимаются к холодным спаям стяжными болтами и планкой. ТЭЭЛ изолированы от конструкций всего устройства слюдяными прокладками. В ТЭГ две термоэлектрические батареи: одна из них питает через вибропреобразователь анодные цепи, другая — цепи накала. Выводы тока крепятся на двух ребрах радиатора.

ТЭГ ТГК-1 обеспечивает питание радиоприемников типа «Воронеж». Испытания небольшой серии таких генераторов показали их высокие эксплуатационные качества [4].

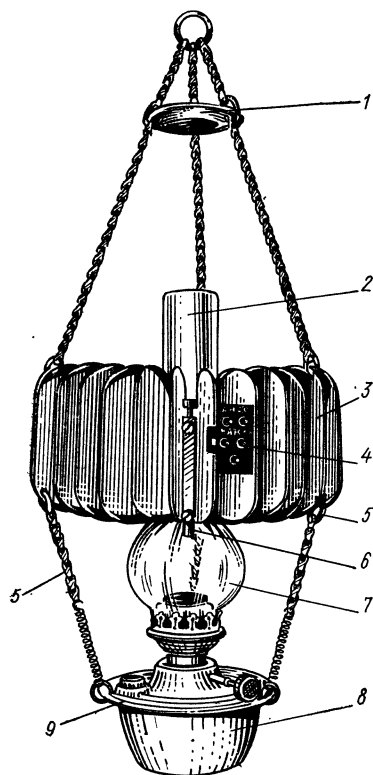


Рис. 6.6

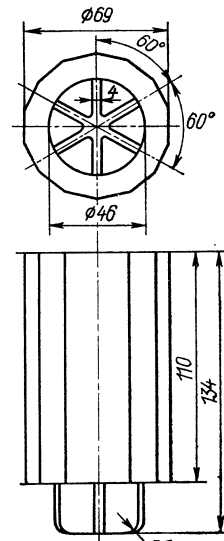


Рис. 6.7

Рис. 6.7. Тепловая труба ТЭГ ТГК-3.

1 — рассеиватель горячих газов, 2 — труба для вывода продуктов сгорания; 3 — ребра охлаждения; 4 — клеммовая колодка; 5 — цепи; 6 — труба с ребрами для нагрева ТЭЭЛ; 7 — ламповое стекло; 8 — резервуар для керосина; 9 — нижний держатель лампы.

Рис. 6.7. Теплопередающая труба ТЭГ ТГК-3.

На рис. 6.6 показан генератор ТГК-3, который по своей основной конструктивной схеме мало отличается от ТГК-1, но имеет большую мощность. В этом ТЭГ применена 20-линейная круглофитильная керосиновая лампа 8 и 7, а металлическая тепловая труба 2 и 6, показанная на рис. 6.7, имеет 14 граней для ТЭЭЛ. Каждый блок ТЭЭЛ охлаждается одним самостоятельным двойным ребром 3, как и в ТГК-1. Высота ТГК-3 от нижнего

среза лампы 8 до кольца 1 около 1 м, диаметр радиатора 300 мм. Однократной заправки лампы хватает примерно на 10 ч работы.

От батареи накала отделением части ТЭЭЛ и дополнительного вывода можно получить напряжение 1,2 в при токе 0,3—0,54 а. Выводные концы от двух автономных батарей ТЭЭЛ подведены к пяти клеммам, сидящим на колодке 4, прикрепленной между ребер радиатора. Вибропреобразователь заключен в отдельный кожух, в верхней части которого смонтирован измерительный прибор для контроля накала ламп радиоприемников и сигнальная лампочка для проверки готовности ТЭГ к работе. На выходе вибропреобразователя можно иметь 120 в при 8 ма или 90 в при 13 ма.

Генерируемой ТГК-3 энергии вполне достаточно для питания различных радиоприемников и других устройств, потребляющих напряжение 1—2 в при токе 0,3—0,5 а и напряжение 90—120 в при токе 8—11 ма.

ТЭГ с вибропреобразователем имеет некоторые недостатки, влияющие на качество радиоприема. Поэтому завод, выпускавший ТГК-3, в дальнейшем серийно выпускал вместо ТГК-3 другой генератор, ТГК-2-2, без вибропреобразователя. Здесь высоковольтная термобатарея из 2600 ТЭЭЛ служила для непосредственного питания анодных цепей на напряжение 120 в при токе 8 ма [1]. Срок службы ТГК-2-2 несколько тысяч часов. Расход керосина около 40 г/ч, а к. п. д. 0,2%. Нагрузочные характеристики этого ТЭГ указаны в табл. 6.2 [7].

Таблица 6.2

Нагрузочные характеристики ТЭГ типа ТГК-2-2

Батарея катода		Батарея анода	
напряжение, в	ток, ма	напряжение, в	ток, ма
1,4	180	150	5
1,2	300	120	7,5
1,0	420	100	9
0,8	540	80	11,5
0,6	650	60	13,5

ТЭГ на керогазе: ТГК-9, ТГК-10, ТГУ-1. Дальнейшее развитие ТЭГ на керосине в направлении повышения мощности привело к разработке в 1954—1955 гг. ТЭГ типа ТГК-9 и мало отличающегося от него ТГК-10, а также ТГУ-1 [1], в которых осветительная лампа была заменена керогазом. Такие ТЭГ начали выпускать в 1957 г. (табл. 6.3).

ТГК-9 и ТГУ-1 внешне похожи друг на друга. Их различие заключалось в устройстве и технологии изготовления ТЭЭЛ. Места спаев ТЭЭЛ в ТГК-9 находятся на некотором расстоянии от нагреваемых и охлаждаемых поверхностей полупроводника (см. рис. 5.3). В результате этого полезно использовалась не вся разность темпе-

Таблица 6.3

Основные характеристики ТЭГ типов ТГК-9 и ТГУ-1

Характеристика	ТГК-9	ТГУ-1
Мощность, <i>вт</i>	9,6	14
Топливо	Керосин	Керосин
ТЭМ:		
<i>p</i> -ветвь	SbZn	SbZn
<i>n</i> -ветвь	Константан	Константан
Форма ТЭЭЛ	Призма	Цилиндр
Число независимых батарей	2	2
Питание анодов	Через вибропреобразователь	Через вибропреобразователь

ратур, создававшихся на полупроводнике ТЭЭЛ. Придав константановому электроду форму перемычки с чашками на концах, которые надевались на цилиндрические ветви из SbZn (см. рис. 5.5), удалось приблизить место спаев к концам ТЭЭЛ, расширив таким образом диапазон рабочих температур. Мощность ТЭГ была увеличена в 1,5 раза, с 9,6 до 14 *вт* с соответствующим увеличением к. п. д. до 0,8—0,9% [1].

На рис. 6.8 представлена конструкция ТЭГ ТГУ-1. Восемь термобатарей охлаждаются ребристыми (два ребра на батарею) радиаторами 1, вертикально расположенными вокруг восьмигранной трубы 2, нагреваемой керогазом 3. При помощи пружин, опирающихся на ножки подставки 5, керогаз 3 поджимается к нижнему срезу трубы, к которой прижаты ТЭЭЛ.

ТЭГ типа ТГК-36. Для питания районных сельских радиозузов в 1959 г. НИИТС (Научно-исследовательский институт городской и сельской телефонной связи) Министерства связи СССР разработал ТЭГ типа ТГК-36, имеющий следующие основные характеристики:

Номинальная мощность, <i>вт</i> . . .	36
Топливо	Керосин
Количество секций (горелок), шт. ТЭЭЛ	2
Перепад температуры на ТЭЭЛ, °С	Sb Zn — константан
	300° С
	Вариант 1
	(одна батарея)
Напряжение, <i>в</i>	24
Ток, <i>а</i>	1,5
Расход керосина, <i>г/ч</i>	350

Устройство ТГК-36 показано на рис. 6.9. Установка состоит из двух независимых ТГК-18 1, смонтированных на общей плите 3. Каждый ТЭГ-18 имеет свою керогазовую горелку и выдает мощ-

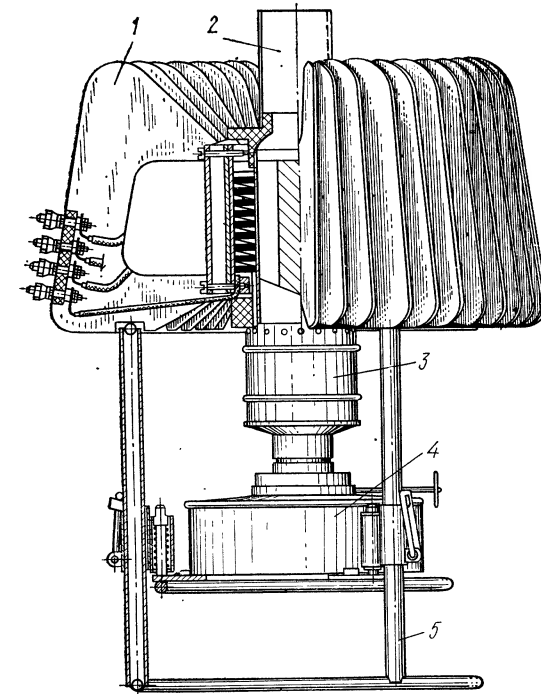


Рис. 6.8. ТЭГ типа ТГУ-1:

1 — ребра охлаждения; 2 — горячая труба; 3 — горелка керогаза; 4 — резервуар для керосина; 5 — подставка установки.

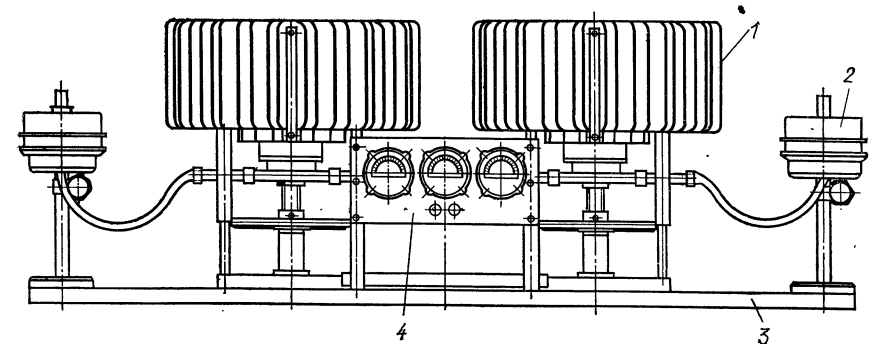


Рис. 6.9. ТЭГ типа ТГК-36:

1 — ТГК-18; 2 — резервуар с керосином; 3 — общая плита; 4 — шит измерительных приборов.

ность 18 *вт*. У этих ТЭГ горелки типа «Саратов» имеют форму чашки, внутри которой уложен кольцом асбестовый шнур—фитиль. Интенсивность горения регулируется изменением высоты резервуаров с керосином 2, которые трубкой соединены с горелкой. Каждая секция ТЭГ может работать независимо. ТЭГ с одной горелкой обозначается ТГК-18.

В средней части станины установки ТГК-36 находится щиток 4 с измерительными приборами: два милливольтметра, подключенные к контрольным термопарам для измерения температуры горячих спаев ТЭЭЛ обеих секций, и вольтметр (в центре), показывающий э. д. с. ТЭГ. Для раздельной работы секций установлены два вольтметра.

Передача тепла от горячих газов к ТЭЭЛ осуществляется с помощью двенадцатигранной силуминовой трубы, внутри которой установлены перфорированные диски, улучшающие подвод тепла к трубе. Снаружи к граням трубы прижаты ТЭЭЛ. Холодные концы ТЭЭЛ снабжены радиаторами из алюминиевых пластинок [1].

ТЭГ мощностью 30 *вт* на бензине (США). Портативный ТЭГ на бензине мощностью 30 *вт* изображен на рис. 6.10 *а, б*. Как показано на рис. 6.10, *а* термоэлементы 1 здесь образуют вертикальную полость-трубу, примыкая к внутренней 4 горячей трубе из бериллия или другого подходящего материала. При этом внутрь обращены горячие концы ТЭЭЛ, а наружу — холодные. Под нижним концом трубы размещена горелка 5, с помощью которой сжигается бензин. Продукты сгорания идут вверх, внутри трубы 4. Окружающий воздух, входящий снизу в кольцевую трубу 2, охлаждает холодные спаи ТЭЭЛ и выходит вверх вместе с продуктами сгорания. Все устройство размещено внутри кольцевого бака 3 для топлива. Основные характеристики этого ТЭГ:

Выходная мощность, <i>вт</i>	30
Выходное напряжение, <i>в</i>	6
Время действия (непрерывное), <i>ч</i>	12
Срок службы, <i>ч</i>	1000
Топливо	Бензин
Продолжительность разогрева, <i>мин</i>	5
Температура пламени, °С:	
на входе	2900
на выходе	2440
Температура ребер радиатора, °С	160
Температура уходящего охлаждающего воздуха, °С	90
Средняя скорость воздушного потока <i>м/сек</i>	0,3
Температура горячих концов ТЭЭЛ, °С	538
Температура холодных концов ТЭЭЛ, °С	204
Вес, включая жидкое топливо, <i>кг</i>	3,2
Материал ТЭЭЛ	Теллури- стый свинец
Число ТЭЭЛ, шт.	96
Размер столбика ТЭЭЛ, <i>мм</i> ³	7,94×6,35× ×6,35

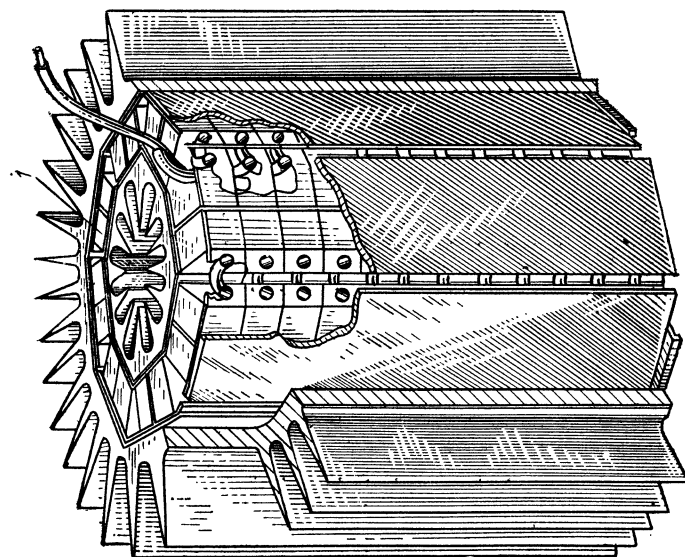
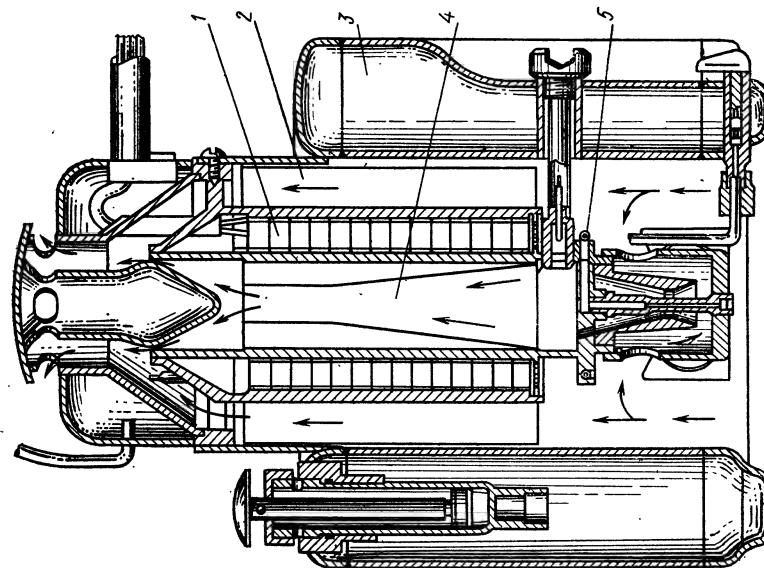


Рис. 6.10. Общий вид (а) и конструктивная схема (б) ТЭГ на бензине: 1 — ТЭЭЛ; 2 — кольцевая холодная труба; 3 — кольцевой бак для бензина; 4 — горячая труба; 5 — бензиновая горелка.

Теллуристый свинец для *n*-ветви легирован теллуристым иодом, для *p*-ветви — натрием.

Во избежание сублимации теллуристого свинца, работающего при 538° С, ТЭЭЛ покрывают слоем металлической окиси, например TiO_2 , с применением стекловидной эмали. Кольцевой бак для топлива, вмещающий около 1 кг бензина, изготавливается из алюминия толщиной 1,27 мм. При помощи небольшого поршневого насоса, вмонтированного в крышку бака, можно поддерживать давление внутри бака около 7 кг/см², что обеспечивает хорошее распыление подогретого топлива в горелке. Клапан на трубе подачи топлива чувствителен к температуре и автоматически поддерживает ее в заданных пределах. Для начального пуска горелки имеется запальное устройство, которое вводится в зону горения через специальную трубу, проходящую через бак. Труба из термоэлементов имеет восемь граней, на каждой из которых находится ТЭЭЛ, так что в каждом горизонтальном ряду размещается по восемь ТЭЭЛ (каждый состоит из двух ветвей). ТЭЭЛ примыкают холодным спаем к наружной алюминиевой трубе, имеющей ребра снаружи. Компоновка ТЭЭЛ и наружной и внутренней ребристых труб показана на рис. 10, б. Для электрической изоляции ТЭЭЛ от внутренней и наружной труб предусматривается применение пластинок, например, из нитрида бора, а для горизонтальных слоев между ТЭЭЛ — листовые слюды. Коммутация горячих концов ТЭЭЛ осуществляется железными пластинками и выводами между ТЭЭЛ на холодном конце.

ТЭГ на бензине мощностью 5 Вт (С Ш А). В ходе второй мировой войны армия США использовала ТЭГ мощностью 5 Вт с металлическими ТЭЭЛ и тепловым к. п. д. менее 0,2%. Характеристики этого ТЭГ [7]:

Мощность, Вт	5
Напряжение при последовательном соединении элементов и токе 2 а, в	2,5
Внутреннее сопротивление термопар, ом	1,7
Материал ТЭЭЛ	Хромель — константан
Число ТЭЭЛ, шт.	168
Топливо	Высокооктановый бензин
Расход топлива, л/ч	3,8
Температура горячего спая, °С	500
Температура холодного спая, охлаждаемого воздухом, °С	90—100
Срок службы термопар, ч	2000
Время непрерывной работы, ч	8
Вес термоэлектрогенератора (установки), кг	5

Эти ТЭГ на бензине были компактными источниками электропитания для переносной радиоаппаратуры малой мощности и одновременно использовались для обогрева помещения.

Хромель-константановые термопары заключены в теплоизолирующую керамику. Применялась бесшумная бензиновая горелка с устройствами, регулирующими подачу воздуха, со смесительной камерой, и игольчатым краном для подачи бензина.

Для питания радиооборудования ТЭГ включался через вибропреобразователь при последовательном соединении термопар. Для зарядки двухвольтовых кислотных аккумуляторов термопары включались двумя параллельными группами, по 84 термопары в каждой. Как видно, температурный перепад на термопарах около 400° С [6].

ТЭГ мощностью 100 Вт (С Ш А). В работе [8] сообщаются некоторые сведения об армейском экспериментальном ТЭГ мощностью 100 Вт, на бензине или керосине, с воздушным охлаждением. Основные характеристики этого ТЭГ:

Температура горячих спаев, °С	910—950
Температура холодных спаев, °С	200—230
Материал термоэлементов	Кремний — германий
Вес ТЭГ, кг	20
Размеры ТЭГ, мм	304×330×457
Расчетный срок службы, ч	1000
Расход бензина, л/ч	0,5—0,8
Номинальное напряжение, в	12—2
Выход генератора на стационарный режим, мин	19

В комплект ТЭГ входит горелка с ультразвуковым распылением сжигаемого топлива. Подвод тепла к горячим спаям осуществляется через поверхность, выполненную в виде сетки из инконелевой проволоки. Охлаждается ТЭЭЛ воздухом, поддуваемым специальным вентилятором, работающим от низковольтного электромотора (12—18 в), получающего питание от самого ТЭГ. Удельная мощность ТЭГ составляет 5 Вт/кг.

Создан также портативный ТЭГ мощностью 150 Вт, весом 13,5 кг, который вместе с топливом может быть перенесен в рюкзаке. Его преимущество — полная бесшумность работы. Для непрерывной работы в течение четырех часов требуется 1,8 л бензина. Топливо под давлением впрыскивается в керамический цилиндр, где сгорает при высокой температуре. Цилиндр окружен ТЭЭЛ на основе теллурида свинца [9].

ТЭГ мощностью 300 Вт и 5 кВт (С Ш А). Исследовательская лаборатория ВМФ США в результате длительных работ создала портативный ТЭГ мощностью 300 Вт, работающий на жидком топливе. Его основные характеристики [10]:

Температура горячих спаев, °С	595
Температура холодных спаев, °С	150
Тип ТЭЭЛ	Слоистые
Материал положительной ветви	Сплав теллурида свинца и олова
Материал отрицательной ветви	Сплав на основе теллурида свинца
Размер ТЭЭЛ, мм:	
диаметр ветви	6,35
длина ветви	3,5
Вес ТЭГ (включая топливо на 8 ч), кг	16,9
Напряжение на нагрузке, в	28
Мощность в начале работы, вт	300
Мощность через 1000 ч, вт	Около 275

Коммутация ТЭЭЛ с медными шинами осуществляется через стальные диски, причем для p -ветвей между стальным диском и элементом дополнительно установлены графитовые диски. Контакты ТЭЭЛ прижимные (пружинные). ТЭГ снабжен устройством для зажигания топлива и автоматического регулирования напряжения.

По заданию ВМФ США был разработан ТЭГ мощностью 5 кВт, состоящий из двух одинаковых агрегатов (полугенераторов), каждый в форме полого цилиндра диаметром и высотой 76 см [11]. В качестве топлива применялся керосин, который сжигался во внутренней полости генератора с помощью вертикальной горелки. Горячие спаи ТЭЭЛ прижимались к внутренней оболочке, а холодные — к наружной, охлаждаемой водой. ТЭЭЛ собраны в модули, последовательно-параллельное соединение которых обеспечивает получение напряжений от 10 до 120 в и силу тока от 500 до 42 а. ТЭГ способен работать в диапазоне температур на ТЭЭЛ 10—650° С.

Каждый полугенератор имеет 14 модулей, расположенных вокруг источника тепла по окружности диаметром 55,9 см. Каждый модуль состоит из соединенных последовательно 85 ТЭЭЛ, которые электроизолированы с обеих сторон и прижимаются к источникам тепла и холода с помощью пружин. Мощность модуля 200 вт, напряжение 8,5 в, сопротивление согласованной нагрузки 0,3 ом. Модуль свободно вынимается из установки, его длина 80 см, ширина 11,6 см, толщина 6,1 см. Модули заполнены инертным газом.

Для питания насоса охлаждения, насоса подачи топлива и вентилятора электроэнергия подается специальными дополнительными модулями, по четыре в каждом полугенераторе, расположенными в верхней части ТЭГ.

При испытаниях ТЭГ его мощность доводилась до 5,9 кВт, причем обеспечивались энергией все вспомогательные двигатели и отдавалось в цепь более 5 кВт. Улучшенные модели ТЭЭЛ были осуществ-

влены на основе PbTe и GeBiTe с к. п. д. по материалу 9,3% при $t_r = 600$, $t_x = 50^\circ$ С и суммарным к. п. д. с учетом контактных сопротивлений, неравномерности нагрева и т. д. около 4,7%.

§ 6.4

ТЭГ на газообразном топливе

В в е д е н и е. ТЭГ на газообразном топливе нашли широкое применение как в Советском Союзе, так и в других странах. Использование газа упрощает регулирование подводимого тепла (легко осуществляется регулированием давления газа в горелке), обеспечивает хорошее сгорание топлива при различных температурах и не сопровождается накоплением шлаков. Все это создает условия для длительной и устойчивой работы ТЭГ. В частности, в СССР пятидесятые годы характеризуются строительством трубопроводов для доставки природного газа и нефти на большие расстояния к центрам потребления. С этим связано и начало у нас широкого использования ТЭГ на газообразном топливе для катодной защиты газопроводов и других трубопроводов от коррозии (в районах, не имеющих электростанций), для обеспечения сохранности трубопроводов при минимальных затратах, а также для других целей.

Газопроводы, находящиеся в поле блуждающих токов или в агрессивных грунтах, быстро выходят из строя в результате появления раковин, свищей и других повреждений в тех местах, где нарушена изоляция трубопроводов. Так, по данным В. П. Проферансова и др. [12], не имеющие электрической защиты газопроводы в Москве и Волгограде выходят из строя через 2—6 месяцев после укладки, в Ростове-на-Дону, Краснодаре, Грозном — через 1—3 года и т. д. Стоимость замены 1 км вышедшего из строя газопровода диаметром 250 мм составляет около 20 000 руб. в средней полосе Европейской части СССР.

Станция катодной защиты трубопроводов представляет собою источник постоянного тока мощностью до 0,5—1 кВт при 10—20 в, отрицательный полюс которого присоединен с помощью изолированного кабеля к газопроводу, а положительный заземлен. Стоимость обычной катодной сетевой станции типа КСС, питающейся от общей электросети и обеспечивающей в среднем защиту 3 км трубопровода, составляет 700—800 руб.

Там, где питание катодной защиты от общей сети невозможно, эффективно применение ТЭГ. Предназначенные для этой цели ТЭГ должны надежно работать длительное время без участия обслуживающего персонала. Вес установки не имеет решающего значения.

Г е н е р а т о р ы ТГГ-10 и ТГГ-16. Для катодной защиты в СССР создано несколько типов ТЭГ мощностью от 10 до 300 вт, в том числе ТГГ-10 и ТГГ-16. Эти ТЭГ разработаны Научно-исследовательским институтом твердых сплавов совместно с Киевским

управлением магистральных газопроводов по инициативе управления газопровода Дашава—Киев [13]. Они имеют по одной батарее ТЭЭЛ (ток 1 а при 10—12 в — ТГГ-10 и 16—18 в для ТГГ-16) и работают на газовом топливе. Батареи состоят из отдельных секций. Горячий спай прижат к силуминовому теплопередачику, холодный — к охлаждающим алюминиевым ребрам. Батарея представляет собою цилиндр, в нижней части которого помещена газовая

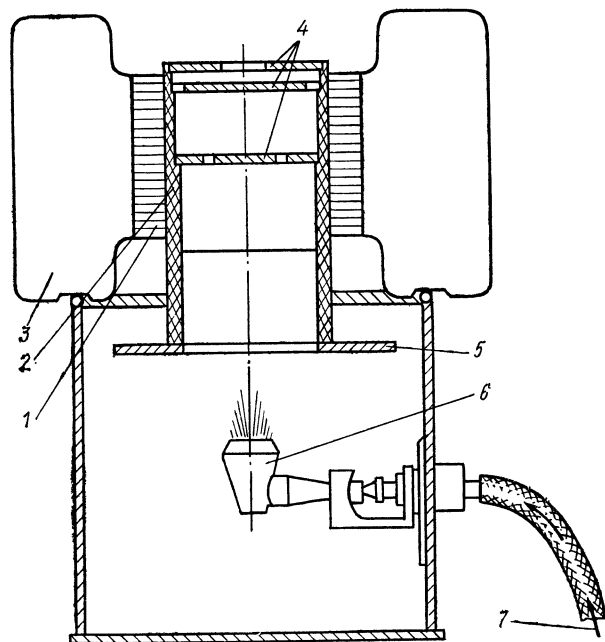


Рис. 6.11. Схема ТЭГ типа ТГГ-16:

1 — термобатарея; 2 — теплопередачик; 3 — охлаждающее ребро; 4 — диски теплопередачика; 5 — асбестовый фланец; 6 — газовая горелка; 7 — газопровод.

горелка (ПБ-40-4), к которой газ поступает под избыточным давлением около 0,015 атм. В установке ТЭГ имеется электромагнитный клапан, способный отсекал подачу топлива. Обычно газ подается к ТЭГ от газопроводов, подведенных к домам ремонтников-обходчиков.

Генератор ТГГ-10 в основном не отличается по принципу действия от генераторов общего назначения, в нем лишь вместо керосиновой лампы используется газовая горелка. В ТЭГ ТГГ-16 применен усовершенствованный способ отвода тепла от горячих газов с помощью перфорированных дисков. Схема этого ТЭГ показана на рис. 6.11.

Указанные генераторы разогреваются до рабочей температуры менее чем за 30 мин. Расход газа (7000—8000 ккал/м³) составляет

0,1—0,2 м³/ч. Низкий тепловой к. п. д. в этих установках несуществен, так как расход газа ничтожен, главное — надежность и простота, низкие эксплуатационные расходы.

Генераторы ТЭГ-50 и ТЭГ-300. Хорошим источником питания для катодной защиты является ТЭГ-50, созданный в 1954 г. А. Н. Ворониным с сотрудниками в Институте полупроводников АН СССР (Ленинград). Другой, еще более мощной моделью является генератор катодной защиты ТЭГ-300. Их основные характеристики указаны в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Характеристики ТЭГ-50 и ТЭГ-300

Характеристика	ТЭГ-50	ТЭГ-300
Мощность, <i>вт</i>	50	300
Напряжение, <i>в</i>	8	от 4 до 24
Количество ТЭЭЛ, шт.	—	4 блока по 384 шт.
Количество батарей, шт.	1	4
Температура горячего спая, °С	350—400	400
Температура холодного спая, °С	130	130
ТЭМ:		
<i>p</i> -типа	SbZn	SbZn
<i>n</i> -типа	Константан	Константан
Топливо	Природный газ	Природный газ
К. п. д. по ТЭЭЛ, %	2	2
К. п. д. общий, %	1	1

Агрегат ТЭГ-300 состоит из четырех самостоятельных батарей, которые в результате их переключения могут давать напряжение от 4 до 24 в. Топливом для горелок служит газ, подаваемый через редуктор из баллонов или прямо из газопровода. В каждой батарее имеется своя горелка инфракрасного горения, керамическая насадка, блок ТЭЭЛ и ребра охлаждения, термопара и электромагнитный клапан на трубе подачи газа. Такие ТЭГ могут обеспечить защиту до 40 км газопровода.

Другие модели ТЭГ на газообразном топливе. Широкое развитие получили ТЭГ на газообразном топливе и за рубежом — в США, Англии, Франции, Италии и в других странах.

В середине пятидесятих годов одна из западноевропейских фирм разработала и изготовила ТЭГ на жаропрочных сплавах с газовыми горелками, весом менее 1 кг для питания радиоприемников и переносной радиоаппаратуры в экспедиционных условиях. Мощность этого ТЭГ около 1 *вт*, газа в одном баллоне весом 4 кг хватало на 150 ч работы [7].

В США первый ТЭГ на газообразном топливе (пропане) мощностью 5 *вт* для промышленных целей был выпущен в 1960 г. В дальнейшем были созданы ТЭГ на газообразном топливе мощностью 5—250 *вт* и более для катодной защиты металлоконструкций, для питания радиоустановок, для освещения служебных вагонов, переносные с удельной мощностью 20 *вт/кг* — для питания релейных станций в труднодоступных районах и т. д.

Примером использования ТЭГ малой мощности на газообразном топливе является установка для подпитки телефонных линий в отдаленных районах [14]. ТЭГ мощностью 1 *вт* с полупроводниковым усилителем вмонтирован в полую опору телефонной линии. Нижняя часть опоры служит хранилищем для топлива — сжиженного газа.

ТЭЭЛ сконструирован в виде коврика. В нем параллельные проводочки из хромеля и константана переплетены стекловолокном. Концы каждого термоэлемента по обе стороны коврика скручены вместе, образуя термопары, соединенные последовательно. На концы термопар, являющиеся горячей стороной, гальваническим способом накладывается толстый слой никеля, а на концы, являющиеся холодной спаем, — толстый слой меди. Никель хорошо противостоит коррозии при нагреве, а медь как хороший проводник тепла способствует охлаждению холодных концов. Установка смонтирована из нескольких изолированных ТЭЭЛ-ковриков, свернутых в трубки горячими концами к горелке, а холодными — во внешнюю сторону для охлаждения. Такой ТЭГ мощностью 1,25 *вт* при 25 *в* может работать в течение 10 и более лет. Расход газа чрезвычайно мал, так как для работы ТЭГ требуется тепла немногим больше, чем от обычной свечи. Запаса сжиженного газа хватает для работы в течение одного года.

Известен пример, когда для катодной защиты был применен ТЭГ мощностью 6 *вт*, хотя поблизости подходила линия электропередачи. В этом случае ТЭГ был применен для защиты газопроводной линии длиной 9 *км*, диаметром 76 *мм*. Сравнение показало, что использование линии электропередачи, проходившей в 200 *м*, требует больших затрат на кабели и выпрямление тока, чем использование термоэлектрогенератора с отбором в качестве газа из трубопровода и сжигание его в горелке [15].

§ 6.5

ТЭГ на солнечной энергии (без концентраторов)

В в е д е н и е. Использование солнечной энергии для непосредственного получения электричества издавна привлекало внимание. Можно считать, что на каждый квадратный метр площади, находящейся на поверхности Земли и ориентированной перпендикулярно солнечным лучам, приходится 1 *квт* тепловой мощности. Всего на

Землю падает световой поток около 10^{14} *квт*, из общего количества, излучаемого Солнцем, $4 \cdot 10^{23}$ *квт* [2].

С помощью генератора, использующего отражатель площадью 1 *м*², по оценкам Б. В. Тарнижевского, можно за год выработать в южных районах СССР (Самарканде, Ташкенте, Ереване) до 65 *квт·ч* электроэнергии, а во Владивостоке, Николаеве около 40—50 *квт·ч* электроэнергии [16].

В конце XIX века появились публикации описаний первых конструкций ТЭГ, использующих солнечное тепло. К числу первых экспериментальных образцов подобных устройств относится солнечный ТЭГ русского астронома В. К. Церасского, построенный в середине девяностых годов XIX века, который приводил в действие звонок при освещении ТЭЭЛ солнечными лучами [2].

Солнечные ТЭГ мощностью до 1 *вт* (с плоскими стеклами). В районах с мощной солнечной радиацией (около 1100 *кал/(ч·см*²) и обилием солнечных дней могут использоваться простейшие ТЭГ с плоскими стеклами («горячие ящики»). Ящик, в котором находятся обращенные к солнцу горячие спаи ТЭЭЛ, накрывают одним, двумя и даже тремя стеклами с небольшими воздушными промежутками (1—3 *см*) между ними. Таким образом, горячие спаи ТЭЭЛ, нагреваясь непосредственно солнечными лучами (в меру прозрачности стекол, которая может быть 70—95%), вместе с тем защищены от охлаждения изолированными воздушными слоями между стеклами.

Подробные результаты изучения некоторых моделей солнечных ТЭГ с плоскими стеклами опубликованы М. Теллес в 1954 г. (США) [17]. Испытывались следующие материалы для этого ТЭГ: хромель и константан; 86,7% Bi + 8,6% Sb и 91% Bi + 9% Sb; ZnSb (Sn, Ag, Bi) и константан; ZnSb (Sn, Ag, Bi) и 91% Bi + 9% Sb. Наибольший к. п. д. ТЭГ с применением указанных материалов около 0,6%. В табл. 6.5 приведены характеристики солнечных ТЭГ с двумя плоскими стеклами и 25 ТЭЭЛ из ZnSb и Bi и хромеля и константана при температуре горячего спаи около 80° С.

Солнечный ТЭГ на 100 *вт* (с плоскими стеклами). Примером солнечной термоэлектрической установки с плоскими стеклами является опытный ТЭГ, описанный в работе [18]. Эта установка имеет поверхность нагрева около 16 *м*². Приемники тепла в этой установке — квадраты из алюминия, покрытые двумя слоями стекла с зазором между ними. Висмут-теллуровые ТЭЭЛ соприкасаются с нижними сторонами приемников тепла, и их горячие спаи нагреваются до 120—140° С. Низкотемпературная сторона ТЭЭЛ охлаждается воздухом. Температура холодных спаев на 20—25% выше окружающего воздуха. Ящики с ТЭЭЛ жестко укреплены на опорной раме, расположенной в направлении восток—запад. Наклон рамы можно регулировать в зависимости от положения Солнца в разные времена года. Электроэнергия около 5,5—7 *вт/м*² использовалась для зарядки 24-вольтовой щелочной

Таблица 6.5

Характеристики солнечного ТЭГ с двумя плоскими стеклами

Характеристика	Полупроводниковые ТЭЭЛ	Металлические ТЭЭЛ
Электрическая мощность на выходе, <i>вт</i>	0,175	0,021
ТЭЭЛ:		
<i>p</i> -ветвь, материал	ZnSb (Sn, Ag, Bi)	Хромель
сечение ветви, <i>мм</i> ²	126	10,3
<i>n</i> -ветвь, материал	91% Bi + 9% Sb	Константан
сечение ветви, <i>мм</i> ²	32	10,3
длина каждой из всех ветвей, <i>мм</i>	25	27
Электросопротивление 25 ТЭЭЛ		
при 20° С, <i>ом</i>	0,126	0,083
при работе, <i>ом</i>	0,137	0,088
Площадь 25 приемников тепла, <i>см</i> ²	340	360
Поверхность охлаждающих ребер	500	500
*всех ТЭЭЛ, <i>см</i> ²		
Разность температур горячего и холодного спаев, °С	54	54,5
ТЭДС одного ТЭЭЛ, <i>мв</i>	12	3,44
ТЭДС всего ТЭГ, <i>в</i>	0,3	0,086
Внешнее сопротивление нагрузки, <i>ом</i>	0,137	0,088
Напряжение на нагрузке, <i>в</i>	0,15	0,043
Электрический ток, <i>а</i>	1,1	0,49
Мощность солнечного излучения, <i>вт</i>	28	31
Полный к. п. д., %	0,59	0,068

аккумуляторной батареи через кремниевые диоды (во избежание разрядки в ночное время и т. п.)

Солнечный ТЭГ для космических целей (США). ТЭГ, схема которого представлена на рис. 6.12, основан на использовании ТЭЭЛ малых размеров объемом около 2,5 мм³, размещенных между двумя параллельными пластинами (например, металлической фольги) в количестве около 3000 шт. на 1 м²; ТЭЭЛ изолированы от пластин и соединены последовательно-параллельно. В космическом пространстве одна пластина, обращенная к Солнцу, нагревается до 300° С, другая (холодная спай) — при этом имеет температуру около 70° С. Каждый ТЭЭЛ в этой конструкции может производить мощность около 10 мвт с к. п. д. около 2%. 1 м² термоэлектрической панели модели весит 10 кг и может выдавать приблизительно 30—40 вт/м² электроэнергии. Изготовлен такой солнечный генератор для космического корабля в виде кассеты поверхностью 30 см² с 12 рядами ТЭЭЛ, по 12 ТЭЭЛ в каждом ряду. Он характеризовался выдачей 2 вт электроэнергии при нагревании Солнцем в космическом пространстве [19].

Солнечные ТЭГ с плоскими поверхностями нагрева не позволяют получить хороший к. п. д. ТЭЭЛ (особенно в земных условиях)

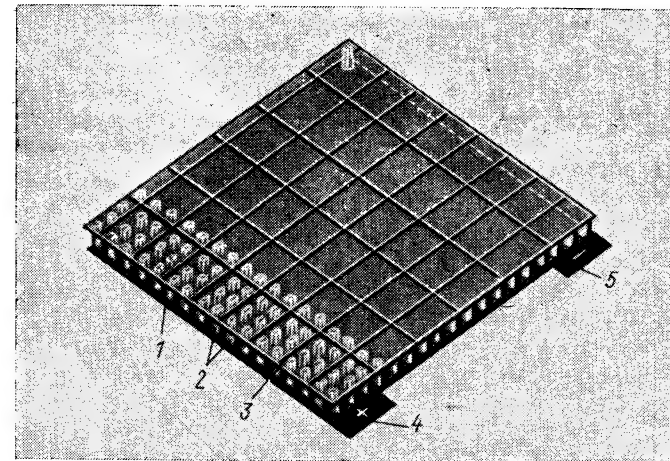


Рис. 6.12. Панель ТЭГ на солнечной энергии:

1 — холодная панель; 2 — ТЭЭЛ; 3 — горячая панель; 4 и 5 — выводы тока.

из-за малых перепадов температуры между горячими и холодными спаями. Лучшие результаты можно получить, используя концентраторы солнечной энергии, хотя это усложняет конструкцию. Такие ТЭГ с концентраторами солнечной энергии рассмотрены в следующем параграфе.

§ 6.6

Солнечные ТЭГ с концентраторами

В в е д е н и е. Как уже отмечалось, к. п. д. ТЭЭЛ растет пропорционально разности температур горячего и холодного спаев а кроме того, и абсолютной температуре горячего спаев. Поэтому заметное повышение тепловой экономичности ТЭГ достигается применением концентраторов солнечной энергии, дающих возможность увеличения температуры горячего спаев ТЭЭЛ до 1000° С.

Термоэлектрический гелиогенератор с концентратором представляет собою термобатарею, установленную в фокальной зоне сферического или цилиндрического зеркала. Солнечные лучи, собранные зеркалом, направляются на поверхность горячих спаев и нагревают их. Холодные спаи охлаждаются воздухом, водяными радиаторами или через лучеиспускание.

Разработаны различные модели солнечных ТЭГ с концентраторами тепла, в том числе с большими и малыми концентраторами, и с аккумуляторами тепла. Серьезный недостаток солнечных ТЭГ

с концентраторами энергии — большая стоимость самих концентраторов. Способы уменьшения этого недостатка разрабатываются как в СССР, так и в других странах. Разработке различных проблем солнечных генераторов посвящено много исследовательских и опытных работ. В частности, оптимизации параметров солнечных ТЭГ посвящена работа М. Гаибназарова и др. [20]. Влияние линейного распределения теплового потока на эффективность ТЭГ оценено Ю. Н. Малевским и др. Советские ученые внесли большой вклад в развитие этой области знаний.

Солнечный ТЭГ с концентратором ГУ-2. Опытный ТЭГ ГУ-2 разработан в Энергетическом институте АН СССР имени Г. М. Кржижановского. Термобатарея, образованная 840 ТЭЭЛ из ZnSb и константана, смонтирована вблизи фокуса параболического зеркала, имеющего площадь 3 м^2 и фокальное пятно диаметром 30 мм [21]. Испытания этого ТЭГ в 1955—1956 гг. при разности температур в 400°С (горячий спай при 420°С , холодный при 20°С) позволили получить мощность $20\text{—}40 \text{ Вт}$ при к. п. д. $1,4\text{—}2\%$ [45, 46]. В установке ГУ-2 использовано зеркало от прожектора диаметром 2 м . Для осуществления поворота зеркала соответственно положению Солнца применена азимутально-зенитная схема суточного вращения. Корректирование вращения осуществляется автоматически.

Солнечный ТЭГ мощностью 10 Вт с концентратором. На экспериментальной базе Энергетического института имени Г. М. Кржижановского АН СССР (Ташкент) в 1959 г. проведены испытания ТЭГ с концентратором диаметром 1 м , являющимся исходной моделью для установки мощностью 1 кВт [22]. В качестве ТЭМ были использованы Bi_2Te_3 (n -ветвь) и $\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Sb}_2\text{Te}_3$ (p -ветвь), температура горячего спаев 300°С , холодного — 70°С . Теплопроводность ТЭМ — $1,16 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}$. Добротность ТЭМ определялась величиной около $0,7 \cdot 10^{-3} (\text{град})^{-1}$. При солнечной радиации $700 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч)}$ расчетная мощность $13,6 \text{ Вт}$, при температуре холодных спаев 70°С . При испытаниях для разности температур горячего и холодного спаев 180°С была получена мощность $10,2 \text{ Вт}$.

Солнечный ТЭГ мощностью 5 Вт с концентратором. ТЭГ с концентратором, являющийся моделью более мощной установки, испытан на экспериментальной базе лаборатории гелиотехники Физико-технического института АН Туркменской ССР [23].

У этого ТЭГ (рис. 6.13) каждая ветвь 7 ТЭЭЛ припаяна к алюминиевому полуцилиндру 8. Два таких полуцилиндра, разделенных электроизоляцией 9, образуют ТЭЭЛ, коммутация ветвей которого (а также с соседними ТЭЭЛ) осуществляется шинами с тепловыми компенсаторами 5, 10. Нижняя часть ТЭЭЛ с упомянутыми полуцилиндрами вставляется в отверстие корпуса 3 с охлаждающей водой, сборка из полуцилиндров уплотняется с корпусом при помощи колец из вакуумной резины 2 и гайки из диэлектрика 1.

Батарея ТЭЭЛ предназначена для работы в интервале температур $50\text{—}450^\circ \text{С}$ и изготовлена из 25 последовательно соединенных ТЭЭЛ из ТЭМ на основе свинца и селена. Длина ветви ТЭЭЛ 13 мм , сечение $13 \times 6 \text{ мм}$.

Для коммутации по горячей стороне использованы шины из материала на основе никеля. Для получения диффузионного коммутационного перехода применялся селен или теллур, прошедшие термообработку в восстановительной среде при $600\text{—}700^\circ \text{С}$. Омическое сопротивление контакта составляло от 10^{-4} до 10^{-6} ом/см^2 . Испыта-

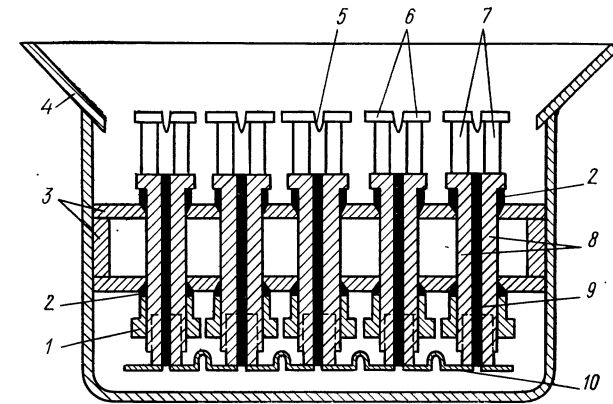


Рис. 6.13. Конструкция солнечного ТЭГ с концентратором:

1 — гайки из диэлектрического материала; 2 — уплотнение из вакуумной резины; 3 — пластмассовый корпус с охлаждающей водой; 4 — отражающий экран; 5 — тепловой компенсатор; 6 — соединительная пластина горячей стороны ТЭЭЛ; 7 — ветви ТЭЭЛ; 8 — полуцилиндры из Al ; 9 — электроизоляция; 10 — соединительная шина с компенсатором холодного конца ТЭЭЛ.

ние стойкости этой коммутации при 450°С в течение 1200 ч на воздухе показало, что сопротивление переходной зоны за этот период не меняется. По холодной стороне коммутация производилась припоем из 50% висмута, 25% олова и 25% свинца с предварительным нанесением на контактную поверхность палладиевого покрытия гальваническим способом.

Общее омическое сопротивление ТЭГ $0,156 \text{ ом}$, сопротивление контактов на горячей стороне $25\text{—}250 \text{ мком/см}^2$, на холодной стороне $40\text{—}170 \text{ мком/см}^2$, сопротивление соединительных шин на холодной стороне 250 мком/см^2 .

Концентратор солнечной энергии — параболоид диаметром $1,4 \text{ м}$ из зеркального алюминия. Площадь фокального пятна генератора составляет 140 см^2 при заполнении ее коммутационными пластинами на $13,5\%$. При уровне солнечной радиации $910\text{—}950 \text{ Вт/м}^2$, температуре охлаждающей воды 18°С и температуре холодных спаев ТЭЭЛ около $25\text{—}30^\circ \text{С}$ получены характеристики, указанные в табл. 6.6.

Таблица 6.6

Экспериментальные характеристики ТЭГ					
Характеристика	Разность температур спаев ТЭЭЛ				
	195	229	267	303	350
Выходная мощность, <i>вт</i>	2,1	3,0	3,9	4,3	5,4
К. п. д. ТЭГ, %	1,82	2,08	2,38	2,44	2,54
Напряжение, <i>в</i>	1,91	2,46	2,98	3,3	3,9
Внутреннее сопротивление, <i>ом</i>	0,443	0,514	0,57	0,63	0,71

Испытания показали, что созданная конструкция надежна и удобна в эксплуатации.

Солнечный ТЭГ водоподъемной установки мощностью 0,3 *квт*. Энергетическим институтом им. Г. М. Кржижановского АН СССР и Физико-техническим институтом АН Туркменской ССР создана и успешно испытана опытная солнечная водоподъемная установка СВ-1 с полупроводниковыми ТЭЭЛ мощностью 0,3 *квт*. Указанный ТЭГ дает электрический ток напряжением 20 *в*, который питает электромотор постоянного тока, приводящий в действие водяной насос. Для сбора излучения Солнца используется параболический концентратор энергии диаметром 4,86 *м* с механизмом суточного слежения и годового склонения [24—26].

Солнечный ТЭГ с малыми концентраторами мощностью 60 *вт*. В Институте полупроводников АН СССР разработан и осуществлен предложенный в 1958 г. А. Н. Ворониным [27] солнечный ТЭГ, в котором большое зеркало заменено соответствующим количеством небольших (с автомобильную фару) алюминиевых рефлекторов. В фокусе каждого рефлектора помещен один ТЭЭЛ, имеющий хороший контакт с самим рефлектором. Сконцентрированные солнечные лучи нагревают ТЭЭЛ, а холодный спай охлаждается самим рефлектором. На рис. 6.14 показана схема этого ТЭГ. Несколько позднее подобная конструкция была разработана гелиотехниками США [2].

Образец такого ТЭГ с 14 малыми концентраторами демонстрировался в 1968 г. в Политехническом музее Москвы.

Анализ особенностей подобных ТЭГ сделан Х. Т. Акрамовым и др. [28], показавшими, что оптимальное отношение температур концентратора и горячего спаев равно 3/4 (по шкале Кельвина) и что с увеличением радиуса концентратора масса солнечного генератора на единицу мощности увеличивается по закону $R^{3/2}$.

Зарубежные исследователи также изучали возможность использования малых концентраторов солнечной энергии. Был создан и испытан ТЭГ, дававший в земных условиях мощность 5 *вт*. Установка состоит из ряда одинаковых концентраторов солнечной энергии, диаметр которых может быть выбранным от 7,6 до 10,2 *см*,

собиравших лучистую энергию на помещенный в фокусе концентратора шарик — приемник излучения, от которого тепло передавалось горячему спаю термоэлемента. Отвод тепла осуществляется с помощью зеркала концентратора.

При испытаниях около 100 ч наибольшее изменение в мощности ТЭГ вызывали неравномерность солнечного излучения и ветер.

Расчет характеристик устройства применительно к полету около Земли или Луны показал, что 676 элементов должны давать 243 *вт*.

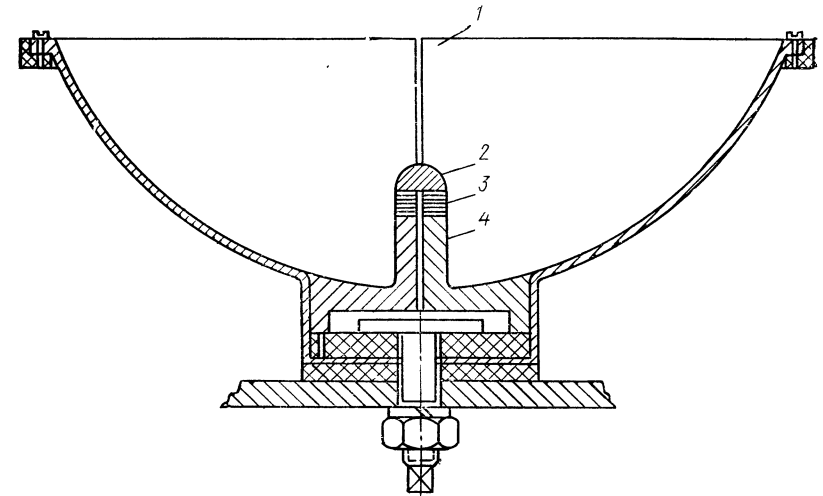


Рис. 6.14. Гелиогенератор А. Н. Воронина:

1 — параболический рефлектор; 2 — приемник солнечного тепла; 3 — ТЭЭЛ; 4 — теплоотвод.

При этом удельная мощность получится около 30—50 *вт/кг*, а с учетом использования аккумулятора энергии на период прохождения в тени планеты удельная мощность будет 18—22 *вт/кг*.

ТЭГ с цилиндрическим гелиоприемником. В СССР изучалась возможность создания солнечного ТЭГ с цилиндрическим гелиоприемником (предполагалось применение концентратора солнечной энергии). В Институте электроники АН УзССР (У. А. Арифов и др. [29]) был создан и испытан ТЭГ этого типа, рассчитанный на получение мощности 35 *вт*. Гелиоприемник из алюминия представлял собой двенадцатигранную призму высотой 120 *мм*, диаметром внутренней полости 60 *мм* и толщиной стенок 15 *мм*. Общая схема этого гелиоприемника дана на рис. 6.15.

При испытаниях использовали концентратор прожекторного типа диаметром 1,5 *м*, ТЭЭЛ изготовлены из Bi_2Te_3 — Bi_2Se_3 и Bi_2Te_3 — Sb_2Te_3 и в количестве 360 шт. расположены по границам гелиоприемника. Холодные спаи ТЭЭЛ охлаждались водой.

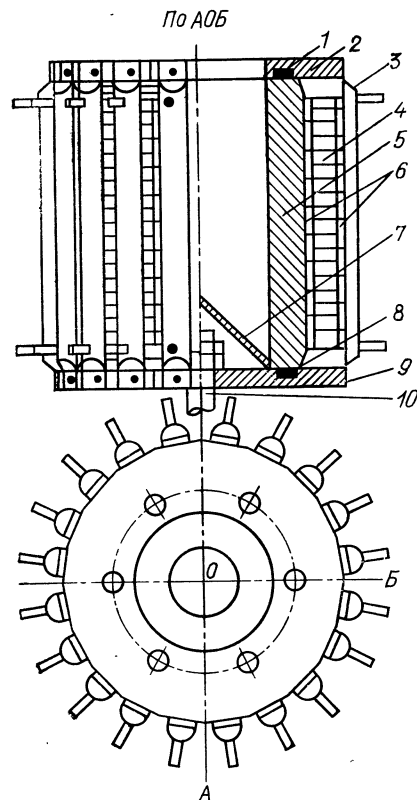


Рис. 6.15. Солнечный ТЭГ с цилиндрическим гелиоприемником:

1 и 8 — теплоизоляционные материалы; 2 и 9 — диски для крепления охлаждающих труб; 3 — трубы водяного охлаждения; 4 — ТЭЭЛ; 5 — приемник тепла (гелиоприемник); 6 — электроизоляционный материал; 7 — отражатель солнечной энергии; 10 — болт для подвешивания ТЭГ к концентратору.

При перепаде температур на ТЭЭЛ 220°C к. п. д. достигал 2,5%, а мощность — около 30 *вт*.

Дно гелиоприемника не имело ТЭЭЛ и не участвовало в работе, оно было снабжено простым рассеивателем энергии. Перепад температур по высоте гелиоприемника во внутренней полости составлял около 40°C . Предварительные опыты по изучению этой модели ТЭГ проводились с использованием электроподогрева.

В США на основе термоэлектрических материалов МСС разработан и собран лабораторный ТЭГ с цилиндрическим приемником тепла и полезной элект-

рической мощностью 50 *вт* для изучения ТЭЭЛ применительно к условиям работы в космосе.

Основные конструктивные характеристики этой установки:

Температура термоэлементов, $^{\circ}\text{C}$:	
на горячей стороне	1215
на холодной стороне	570
Число последовательно соединенных секций (полуколец) термоэлементов, шт.	46
Число параллельных ветвей в секции, шт.	2
Размер термоэлементов, мм:	
диаметр	9,5
длина	16,5
Тип термоэлементов	Каскадные, из двух материалов
Материал термоэлемента:	
по <i>p</i> -ветви	МСС-40, МСС-50
по <i>n</i> -ветви	МСС-40, МСС-60
Диаметр термоэлектрогенератора (по концам пластин радиатора), мм . .	155

Длина ТЭГ по оси источника тепла (наибольший размер генератора), мм . .	406
Тепловой к. п. д., %	4
Вес генератора без источника тепла, кг	1

ТЭГ представляет собой колонку из секций «разрезных колец». В каждой такой секции-полукольце имеются две ветви *n*-типа и две ветви *p*-типа. Две таких секции образуют кольцо, из 23 колец образуется колонка с отверстием в центре, через которое можно подводить тепло. На наружных концах ветвей ТЭЭЛ находятся пластинки-радиаторы.

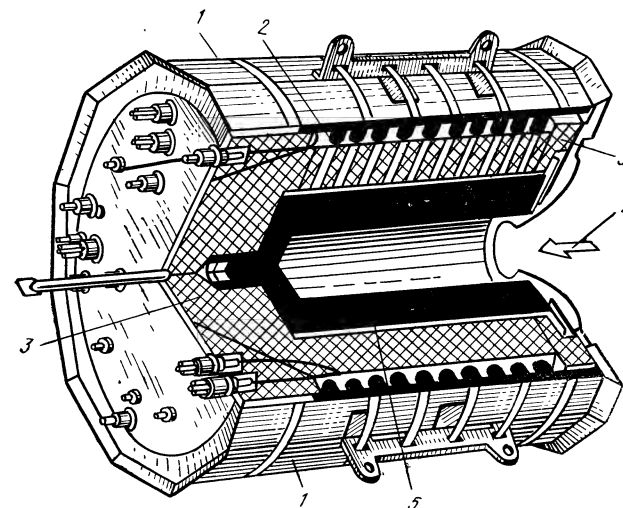


Рис. 6.16. ТЭГ с аккумулятором тепла:

1 — радиатор; 2 — термоэлектрические модули; 3 — изоляция; 4 — солнечная энергия; 5 — аккумулятор тепла с гидридом лития.

Испытания в течение 2500 ч проводились при 1200°C на горячей стороне в вакууме 10^{-5} мм рт. ст. и при разности температур горячего и холодного спаев около $460\text{--}490^{\circ}\text{C}$. При этих испытаниях выяснилось, что происходит отжиг зажимов радиаторов, изменения изоляционных материалов и некоторые другие, не повлиявшие на проведение испытаний изменения.

Солнечный ТЭГ с аккумулятором тепла. В 1962 г. в США была начата разработка, а затем изготовлен образец и проведено испытание солнечного ТЭГ с полезной мощностью 10 *вт* применительно к искусственному спутнику Земли с периодом обращения 90 мин, получающему тепло от Солнца в течение 55 мин. Модель этого ТЭГ, показанная на рис. 6.16, отличалась наличием аккумулятора тепла для непрерывной подачи электроэнергии в течение 90 мин [31]. Солнечные лучи, фокусируемые зеркалом диаметром 1,5 м, концентрируются в средней полости ТЭГ, образован-

ной в контейнере с гидридом лития. Наружная сторона контейнера соприкасается с горячими концами термоэлементов. Холодные концы термоэлементов примыкают к наружному кожуху, являющемуся охлаждающим радиатором. Основные характеристики этого ТЭГ:

Средняя выходная мощность в зависимости от режима, <i>вт</i>	12—18
Выходное напряжение, <i>в</i>	Около 15
Тепловая мощность, подводимая к генератору, <i>вт</i>	340—350
Состав материала термоэлементов:	
<i>p</i> -типа	(GeTe _{0,95}) (BiTe _{0,05})
<i>n</i> -типа	PbTe (0,1 % Bi)
Размер ветви термоэлемента, <i>мм</i>	6,35 · 6,35 · 25,4
Число модулей в батарее, соединенных последовательно, шт.	12
Число термоэлементов в модуле, соединенных последовательно, шт.	10
Температура плавления гидрида лития в аккумуляторе тепла, °С	689
Емкость аккумулятора тепла, <i>вт·мин</i>	12320
Отношение выходной мощности к входной, %	3,5

Солнечный ТЭГ с таким тепловым аккумулятором работал на орбите следующим образом: на освещенном солнцем участке с помощью концентратора солнечных лучей плавится аккумулирующий тепло гидрид лития; одновременно солнечное тепло используется для нагревания горячих спаев ТЭЭЛ. На затененной части орбиты гидрид лития затвердевает, отдавая теплоту плавления на поддержание температуры горячих спаев ТЭЭЛ, при этом для уменьшения потерь тепла на излучение, отверстие, через которое входит в генератор пучок солнечных лучей, закрывается каким-либо автоматически действующим устройством.

В качестве аккумулирующего материала рассматривались кремний, гидрид лития, окись кальция—окись магния, окись бериллия — окись магния и др.

Гидрид лития был применен как обладающий большой теплотой плавления (648,8 ккал/кг). Он помещен в контейнер из специального подобранного материала, устойчивого против коррозии, а также снабженный покрытием, предотвращающим утечку водорода. В контейнере имелись устройства из гофрированного молибдена для компенсации 30% изменения объема гидрида при нагреве, а также для улучшения передачи тепла через гидрид лития, имеющий низкую теплопроводность. При отработке технологии заполнения гидридом лития контейнера выяснилась необходимость принятия мер по очистке гидрида от кислорода, так как в контейнере образовывались пустоты и обнаруживалось до 8% окиси лития. Применялась изоляционная прокладка между горячими спаями термоэлементов и аккумулятором тепла, которая подбиралась опытным путем. Радиатор для отвода тепла сделан из бериллиевой бронзы.

ТЭГ проработал на испытаниях около 1000 ч; было проведено более 500 термических циклов, после чего температура чрезмерно повысилась и генератор разрушился. К концу этого испытания мощность ТЭГ снизилась на 15% начального уровня. Колебания мощности ТЭГ в течение 90-минутного цикла (включая 35 мин охлаждения) составили около 7% среднего значения.

По оценке авторов конструкции, для такой системы термоэлектрического генератора может быть получена мощность в пределах 5—75 *вт* на 1 кг веса ТЭГ при эффективности установки 5%. Подобный солнечный ТЭГ с аккумулятором тепла мощностью 14 *вт* был запущен на орбиту на спутнике с периодом обращения 90 мин, из которых 55 мин последний находился на освещенной Солнцем стороне. Аккумулятор тепла изготовлен из гидрида лития, а ТЭЭЛ—из 0,95 GeTe + 0,05 BiTe и PbTe + 0,1% Bi. Этот ТЭГ на орбите работал с отклонением от средней мощности ±7%, к. п. д. ТЭЭЛ достигал 3,5% [32].

§ 6.7

ТЭГ с некоторыми другими источниками тепла

Возможность использования других источников тепла как с большим, так и с малым перепадом температуры для получения электроэнергии с помощью ТЭЭЛ (геотермальные воды, тепло человеческого тела, отработанные газы ракетных установок и т. п.) нашла свою реализацию в ряде своеобразных конструкций ТЭГ. Для них наиболее подходящими термоэлектрические материалы с высокой добротностью при низких температурах. К таким материалам можно отнести теллурид свинца с добавкой 0,1% натрия, добротность которого равна $0,8 \cdot 10^{-3} \text{ (град)}^{-1}$ при 200°С и $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ (град)}^{-1}$ при 0°С.

Большое практическое значение может иметь использование тепла геотермальных вод. Созданы экспериментальные образцы ТЭГ, пригодные для использования тепла природных горячих источников. Недостаточно высокая тепловая экономичность такой термоэлектрической геотермальной электростанции может быть скомпенсирована простотой и надежностью ТЭГ, способностью работать без обслуживающего персонала.

Тепло человеческого тела также может быть использовано для создания разности температур между горячим и холодным спаями ТЭЭЛ. Такие ТЭГ из хороших ТЭМ способны обеспечить получение мощности 0,01 *вт* и более, если перепад температуры порядка 40—50°С. В частности, к таким устройствам относится ТЭГ, запатентованный в СССР. Несколько десятков миниатюрных ТЭЭЛ образуют гибкий браслет, надеваемый на запястье руки. Такой ТЭГ может обеспечить питание транзисторного приемника и передатчика, в особенности в районах с холодным климатом.

Другой пример устройств этого типа — японский полупроводниковый радиоприемник, не нуждающийся в гальванических батареях или аккумуляторах. Здесь имеется термоэлектрическое устройство, которое дает необходимый электрический ток, если термопластинку надеть на руку.

Для армии в США разработаны конструкции ТЭГ, основанные на нагреве горячего спаи отработанными газами ракетных двигателей, а также на нагреве при повторном входе аппарата в атмосферу [33, 34]. Вариант такого ТЭГ описан ниже.

На одну из поверхностей алундовой пластинки (96% Al_2O_3) размером 100—130 мм нанесен слой платины, несколько перекры-

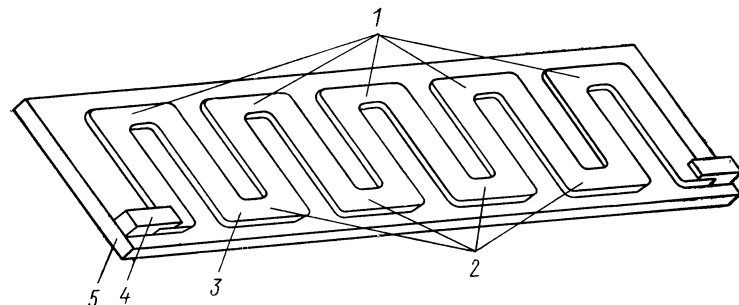


Рис. 6.17. Тонкопленочная батарея из пяти ТЭЭЛ:

1 — горячие спаи; 2 — холодные спаи; 3 — напыленная пленка *n*- или *p*-типа; 4 — припаянный проводник; 5 — стеклянная подложка.

вающий вторую поверхность, покрытую слоем легированной окиси никеля (с добавкой лития) толщиной 0,38 мм. Слои платины и окиси никеля на пластинке надрезали алмазной пилой (толщина пилы 0,15 мм) таким образом, чтобы получилось 100 спаев ТЭЭЛ из окиси никеля с платиной, соединенных последовательно. Весь ТЭГ состоял из 14 указанных пластинок, соединенных керамическими болтами. Объем батареи был около 330 см³. ТЭДС этого ТЭГ составляла 100 в. Такие окисные ТЭЭЛ пригодны лишь в случаях, когда надо получить высокую ТЭДС и важна стойкость ТЭЭЛ в окислительной атмосфере.

При измерении больших токов в качестве датчиков повышения температуры, когда требуется очень небольшая мощность генератора электрического тока (порядка 10^{-3} — 10^{-6} Вт), можно применять пленочные термоэлектрические генераторы, для изготовления которых используется вакуумное испарение и осаждение пленки на подложку.

На рис. 6.17 показана схема такого ТЭГ с пятью термоэлементами общей мощностью около $1 \cdot 10^{-6}$ Вт [35].

Генераторы действовали по 100 ч без заметного изменения характеристик. Материалом ветвей были сплавы теллура с сурьмой и висмутом, висмута с селеном и легирующими примесями при

добротности $2,2 \cdot 10^{-3}$ (град)⁻¹.

Максимальная мощность, мкВт	0,78—1,28
Общая ТЭДС, в	0,125—0,160
Средняя удельная ТЭДС, мкВ	125—160
Электрическое сопротивление, ом	3400—7600
Температура, °С:	
горячего спаи	145
холодного спаи	25

Технология изготовления ТЭЭЛ состояла в испарении указанных выше ТЭМ в вакууме более $3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. В качестве подложек использовали стекло, слюду, тефлон и алунд при температуре около 30° С. Измельченные термоэлектрические материалы нагревались в танталовой лодочке, до температуры, немного большей температуры их плавления, что приводило к скорости осаждения около 500 Å/мин. Далее производилась термообработка пленок при 350° С, уменьшавшая электрическое сопротивление приблизительно на порядок и более. Нагрев выше 350° С ухудшал качество пленок.

РАДИОИЗОТОПНЫЕ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
ГЕНЕРАТОРЫ

§ 7.1

Радиоизотопная энергетика

Попытки использовать энергию радиоактивного распада сводились к созданию ядерных батарей, принцип действия которых основан на разделении и сборе зарядов без использования тепловой энергии. За последние годы разработано три основных типа ядерных батарей.

Первый из них основан на генерации электрической энергии в результате работы, совершаемой продуктами радиоактивного распада (заряженными частицами) против сил электрического поля. Электрическая энергия в таком устройстве получается непосредственно, без преобразования других видов энергии. По конструкции эти батареи представляют собой две концентрические или параллельные поверхности, разделенные зазором, который может быть или откачан, или заполнен диэлектриком. Одна из поверхностей, на которую наносится радиоактивный изотоп, служит излучателем, а другая — коллектором. Электроны, испускаемые излучателем, собираются на коллекторе и заряжают его отрицательно по отношению к излучателю. Максимальная разность потенциалов на электродах ограничивается энергией заряженных частиц и обычно достигает нескольких киловольт. Сила тока батареи зависит от интенсивности радиоактивного источника.

Второй тип ядерных батарей основан на способности заряженных частиц и γ -квантов, испускаемых радиоактивными изотопами, создавать вторичные эффекты в веществе. Некоторые из этих эффектов можно использовать для получения электрического поля. Например, при облучении полупроводниковых материалов в них образуются отрицательные (*электроны*) и положительные (*дырки*) носители тока. Кинетическая энергия частиц в этом случае преобразуется в потенциальную энергию разделенных электронно-дырочных пар. По принципу действия такие устройства аналогичны солнечным элементам, только в этом случае роль солнечного излучения играют β -частицы или γ -кванты.

И наконец, разрабатываются ядерные батареи *третьего типа*, в которых вторичные эффекты используются для генерации других вторичных эффектов, а эти последние, в свою очередь, дают электрическую энергию. Потенциальные возможности батарей такого типа очень высоки, поскольку существует много комбинаций физи-

ческих процессов преобразования с получением электроэнергии. Однако реальные возможности этих батарей мало исследованы. Практические результаты получены только при использовании одного варианта, при котором в результате поглощения заряженных частиц в сцинтилляторе их кинетическая энергия переходит в световую, а последняя в солнечных элементах преобразуется в электричество.

Современные ядерные батареи характеризуются очень низкими уровнями мощности (микро- и милливатты), поэтому область их использования ограничена. Эти устройства применяются для питания схем на транзисторах и компенсации утечек в зарядных схемах, для подачи постоянного напряжения на цепи смещения, в качестве эталонных источников тока, источников электроэнергии для часов, для зарядки дозиметров и др.

В начале пятидесятых годов в результате эксплуатации промышленных ядерных реакторов появилось значительное количество продуктов деления и мощность радиоактивных изотопов, пригодных для технических целей, возросла. В это время радиоизотопы начали изучаться не только как излучатели заряженных частиц и γ -квантов, но и как источники тепловой энергии.

Радиоактивный распад ядра сопровождается испусканием энергии. Основная доля этой энергии проявляется в виде кинетической энергии заряженных частиц и γ -квантов. В результате поглощения излучения окружающей средой кинетическая энергия излучения превращается в тепловую и среда нагревается. Тепло, генерируемое радиоактивным изотопом, с помощью термоэлектрического или других способов может быть преобразовано в электроэнергию. Принцип действия такого генератора аналогичен принципу действия обычной тепловой машины, состоящей из нагревателя, системы преобразования энергии и холодильника.

В указанный период возникла необходимость в компактных источниках энергии с достаточно длительным сроком службы как космического, так и наземного назначения. Тогда же начали разрабатываться работы по изучению возможности использования для этих целей полупроводниковых материалов и созданию термоэлектрических устройств.

Разработка первых радиоизотопных термогенераторов («Бета», СНАП-3 и др.) показала, что эти установки настолько надежны в эксплуатации и имеют такие большие возможности улучшения рабочих характеристик, что вряд ли они могут быть вытеснены в ближайшем будущем какими-либо другими устройствами.

Современные изотопные термогенераторы характеризуются электрической мощностью от 5 до 100 Вт, к. п. д. 3—5% и сроком службы без замены топлива от трех месяцев до десяти лет. Область применения этих установок непрерывно расширяется: их можно использовать как источники питания для космических и наземных установок, в том числе для автономных средств сигнализации, телеметрической системы передачи метеорологических данных, ли-

ний радиосвязи, катодной защиты трубопроводов, источников резервного и аварийного питания, автоматических морских буев и т. д. Эксплуатация установок типа «Бета» на метеорологических станциях, расположенных в районах Крайнего Севера и Сибири, показала, что в этих районах изотопные генераторы в настоящее время находятся вне конкуренции [1].

Радиоизотопный термогенератор очень удобен для использования в космических аппаратах прежде всего из-за чрезвычайной простоты, надежности и стабильности его работы. На характеристики этой системы не влияют такие факторы, как глубокий вакуум, невесомость, столкновения с микрометеоритами, радиационные пояса, солнечные вспышки, перегрузки, характерные для ракетных систем, вращение и потеря устойчивости космического аппарата. Поскольку изотопный термогенератор может работать при высоких значениях теплового потока и температуры, он почти нечувствителен к поглощению и отражению солнечных лучей, к изменению температуры в соответствии с временем суток на орбите, а также к локальным изменениям температуры космического аппарата.

Солнечные фотоэлементы, конкурирующие с изотопным генератором, весьма чувствительны к космическим условиям и режиму эксплуатации. Химические батареи значительно уступают изотопным генераторам как по сроку службы (1—2 недели), так и по энергоемкости. По американским данным, изотопный термогенератор СНАП-3 мощностью 2,7 *вт*, весом 2 *кг* в течение пятилетнего срока службы выработал количество электроэнергии, для получения которого потребовались бы химические батареи весом 3,2 *т* (см. далее).

За последнее время началась разработка конструкций изотопных термогенераторов, предназначенных для питания аппаратуры гидроакустических маяков; устройств для противолодочной обороны; подводных океанографических установок, оборудованных сейсмографами, датчиками температуры и солености воды и т. п. Дальнейшие исследования подводного мира могут открыть новые области применения изотопных термогенераторов, где они окажутся единственно возможными источниками энергий.

Кроме того, интерес к изотопным термогенераторам начинают проявлять нефтяная и газовая промышленность, медицина и другие области науки и техники.

Проведены эксперименты, цель которых создать источник энергии для искусственного сердца (насоса), которое сможет выполнять ту же работу, что и данное нам от рождения. В США была сделана уникальная операция собаке: в ее аорту установили изотопный генератор на плутонии-238. У животного удалили часть аорты и вместо нее вставили титановую трубку с изотопным источником тока. Плутоний-238 был заключен в металлическую ампулу, соединенную с горячими спаями термоэлементов, холодные спаи постоянно омывались кровью, при этом температура тела собаки практически не повышалась. Такой генератор мощностью 25 *вт* на плутонии-238 может работать несколько лет.

В настоящее время разрабатываются датчики на радиоизотопах для стимулирования деятельности сердечной мышцы. Такой датчик с термоэлектрогенератором на плутонии-238 мощностью 160—200 *мквт* может работать без замены десятки лет. Полагают, что потребность в подобных источниках составит десятки тысяч штук в год.

Развитие радиоизотопных генераторов идет по пути повышения их мощности и к. п. д. В настоящее время разрабатываются проекты установок на радиоизотопах мощностью до 10 *квт*.

Новые термоэлектрические материалы позволяют создавать генераторы с к. п. д. 7—10% и более. Постоянно растущее производство радиоактивных изотопов обеспечивает надежную поддержку развитию изотопной энергетики, которое пошло по линии создания тепловых машин, и это направление остается основным.

Ниже приведены характеристики некоторых радиоактивных изотопов, описываются конструкции и результаты испытаний изотопных генераторов, действующих и разрабатываемых в СССР, в США и в других странах.

§ 7.2

Радиоактивные изотопы как источники тепла

К р и т е р и и в ы б о р а р а д и о а к т и в н ы х и з о т о п о в. В настоящее время известно более 1000 радиоактивных изотопов, и только некоторые из них пригодны для использования в качестве источников тепла. Выбор изотопов для указанных целей производится в первую очередь с учетом их физических свойств, таких, как период полураспада, удельная мощность, уровень кинетической энергии и тип проникающего излучения. Чрезмерная токсичность и наличие жесткого γ -излучения особенно нежелательны для радиоизотопных источников тепла.

Период полураспада изотопа должен быть не меньше нескольких месяцев (порядка 100 дней). Это определяется сроками изготовления изотопного топлива, временем его хранения и необходимостью регулирования мощности теплового источника. Верхний предел полураспада в некоторой степени произволен. Его можно принять равным 100 годам, поскольку радиоактивные изотопы с периодом полураспада свыше 100 лет характеризуются очень низкой плотностью тепловыделения и поэтому как источники тепла практически не используются.

Важный параметр для любого радиоизотопного генератора — удельная мощность. Удельная мощность может быть определена из следующего выражения:

$$p = 2,12 \cdot 10^3 [E_{\text{ср}} / (AT_{1/2})] \exp(-\lambda t), \quad (7.1)$$

где p — удельная мощность, $вт/г$; $E_{ср}$ — средняя энергия, поглощенная в топливе, $Мэв$; $T_{1/2}$ — период полураспада, годы; A — атомная масса, $г/моль$; λ — постоянная распада ($\lambda = 0,693/T_{1/2}$); t — время, годы.

Уравнение (7.1) справедливо только для чистого изотопа, не содержащего каких-либо примесей или разбавителей. Для использования в термоэлектрическом генераторе наиболее подходящим был бы изотоп, обладающий длительным периодом полураспада и высокой удельной мощностью. Однако, как видно из уравнения (7.1), эти величины обратно пропорциональны.

Радиоактивный изотоп, обладающий удельной мощностью 0,1 $вт/г$ и выше, можно рассматривать как пригодный для изотопных генераторов. В случае применения изотопов с более низким значением удельной мощности потребуются значительные объемы топлива, что приведет к существенному увеличению веса защиты и снижению к. п. д. генератора.

Уровень кинетической энергии излучения — важный критерий пригодности радиоактивного изотопа, поскольку степень нагрева топлива зависит от величины этой энергии. Максимальная энергия у α -излучателей, отобранных на основе критерия периода полураспада, находится в интервале 4—7 $Мэв$, а у β -излучателей — в интервале 0,2—3 $Мэв$. Низкий уровень кинетической энергии излучения может исключить изотоп из числа пригодных, несмотря на приемлемый период полураспада. Например, период полураспада трития составляет 12,26 лет, но из-за низкой энергии β -частиц (максимальная энергия 0,018 $Мэв$) он не может быть использован как источник тепла. Характеристики радиоактивных изотопов, потенциально пригодных для термоэлектрических генераторов, приведены в табл. 7.1. Однако вышеуказанные ограничения недостаточны для практических целей. Необходимо также учитывать физико-химические и технические характеристики радиоизотопного топлива (табл. 7.2). Топливо должно обладать высокой химической стабильностью и достаточно хорошими технологическими свойствами при высоких температурах (от 500 до 1600° С). К таким свойствам относятся температура плавления, газовыделения (образование гелия в α -излучателях), теплопроводность и плотность.

Некоторые радиоактивные изотопы имеют очень высокую удельную мощность, затрудняющую их химическую обработку и равномерный подвод тепла к системе преобразования. К таким изотопам относится кюрий-242, излучение которого настолько интенсивно, что окисление происходит при любых химических процессах обработки, а заготовка из металлического кюрия весом 1 г находится в раскаленном состоянии в результате радиоактивного нагрева (удельная мощность 121 $вт/г$). Поэтому при использовании кюрия-242 в качестве топлива его необходимо разбавлять другими металлами с хорошей теплопроводностью.

Топливо должно использоваться в виде соединения, обладающего хорошей коррозионной стойкостью, совместимостью с конст-

Таблица 7.1
Характеристики радиоактивных изотопов [2, 3]

Изотоп	Период полураспада	Удельная мощность, $вт/г$	Изотопный состав, %	Тип распада и энергия, $Мэв$	Плотность, $г/см^3$	Темп. плавления, °С	Чистота		Биологическая активность в воздухе, $мккюри/см^3$
							радиохимическая, %	химическая, %	
Кобальт-60	5,25 года	0,22 по β 5,32 по γ	^{60}Co —31,6 ^{58}Co —68,4	$\beta(0,31)$ $\gamma(1,17)$ $\gamma(1,33)$	8,9	1480	^{60}Co —100	^{60}Co —99 ^{60}Ni —1	$3 \cdot 10^{-9}$
Стронций-90	28,4 года	0,93	^{90}Sr —55 ^{88}Sr (стаб.)—43,9 ^{86}Sr (стаб.)—1,1	$\beta(0,54)$ $\gamma(1,73)$	2,6	770	^{90}Sr —99,9	$Sr > 95$ Примеси Ca, Ba	10^{-11}
Цезий-137	30 лет	0,27	^{137}Cs —36,5 ^{135}Cs —20,1 ^{133}Cs —43,4	$\beta(0,51)$ —92% $\beta(1,17)$ —8% $\gamma(0,66)$	1,87	28,5	^{137}Cs —95 ^{134}Cs —5	Cs —98 Rb, Na, K—2	$5 \cdot 10^{-9}$
Церий-144	284,5 суток	2,6	^{144}Ce —13,3* ^{142}Ce —42,7 ^{140}Ce (стаб.)—44	$\beta(0,018)$ —30% $\beta(0,32)$ —65% $\beta(0,24)$ —5%	6,7	804	^{144}Ce —99	Ce—99	$2 \cdot 10^{-10}$
Прометий-147	2,6 года	0,37	^{147}Pm —100	$\beta(0,23)$	4,4	1297	^{147}Pm —99 ^{148}Pm —1	Pm—95 Nd—5	$2 \cdot 10^{-9}$
Полоний-210	138,3 суток	142	^{210}Po —100	$\alpha(5,3)$ —100% $\gamma(0,8)$ —слабое	9,3	254	^{210}Po —100	Po—95	$2 \cdot 10^{-10}$
Плутоний-238	86,4 года	0,55	—	$\alpha(5,49)$ $\gamma(0,04)$	16,5	640	—	—	$7 \cdot 10^{-10}$
Кюрий-242	162 дня	121	^{242}Cm —98	$\alpha(6,11)$ —73,7% $\alpha(6,06)$ —26,3% $\gamma(0,44)$	13,5	950	^{242}Cm —99	^{242}Cm —40 ^{241}Am —60	$7 \cdot 10^{-11}$
Кюрий-244	18 лет	2,8	^{244}Cm —96 ^{245}Cm —1 ^{246}Cm —3	$\alpha(5,8)$ —76,7% $\alpha(5,7)$ —23,3% $\gamma(0,043)$	13,5	950	^{244}Cm —99	^{244}Cm —99,5 ^{243}Am —0,5	$7 \cdot 10^{-14}$

* Состав после года распада.

Характеристики изотопного топлива [4, 5]

Характеристика	Co (металл)	SrTiO ₃	Боросили- катное стекло	CeO ₂	Pt ₂ O ₃	Po (металл)	PuO ₂	Cm ²⁴² O ₃	Cm ²⁴⁴ O ₃
Удельная мощность, <i>вт/г</i>	2,9	0,24	0,07	2,84	0,32	142	0,39	44,1	2,53
Плотность мощности, <i>вт/см³</i>	26	0,82	0,24	18,7	2,03	1320	3,9	397	22,5
Удельная активность, <i>кюри/вт</i>	65,1	148	207	126	2440	31,2	30	—	29,2
Плотность, <i>г/см³</i>	8,9	3,7	3,1	6,6	6,6	9,3	10÷12	9,0	9,0
Температура плавления, <i>°C</i>	1480	1900	1275	2680	2350	254	2240	1950	1950
Коэффициент теплопроводности, <i>вт/(м·град)</i>	54—71 при 20°C	5—7 при 20°C	0,4—0,8 при 20°C	0,9—3,0 при 100—1000°C	2,5 при 150°C	—	—	2,8 при 125°C	2,8 при 125°C
Коэффициент расширения, <i>10⁻⁵, (град)⁻¹</i>	1,2—1,7 при 20°C	1,12	—	1,07—1,29 при 0—1300°C	1,08 при 30—740°C	—	—	1,05 при 25—1000°C	1,05 при 25—1000°C
Выделение газа при распаде	Не обна- ружено	Не обна- ружено	Не обна- ружено	Не обна- ружено	Не обна- ружено	Гелий*	Ге- лий**	Гелий**	Гелий**
Материал ампулы	—	Нержавею- щая сталь+ хастеллой-С	Нержавею- щая сталь+ хастеллой-С	Вольфрам+ +молиб- ден+тантал	—	Никель+ +нержа- вующая сталь	Тан- тал	Хастел- лой-С	Хастел- лой-С

* 0,05 *см³/вт* при давлении 100 *атм* в течение периода полураспада.

** Гелий выделяется сравнительно медленно из-за большого периода полураспада.

*** 13,9 *см³* выделяет источник с начальной активностью 1000 *кюри* за период полураспада.*** 84,7 *см³* выделяет источник с начальной активностью 1000 *кюри* за 2 года (0,11 периода полураспада).

рукионными материалами и стабильностью во времени. Оно должно быть нерастворимо в пресной и морской воде, чтобы в случае аварии, например космического генератора, избежать попадания радиоактивности в биосферу. В большинстве генераторов наземного и подводного применения используется стронций-90. Этот изотоп, хорошо растворяясь в воде и являясь одним из наиболее опасных радиоактивных веществ, может быть применен только в виде инертного и стабильного соединения. Результаты исследований таких нерастворимых соединений стронция, как бораты, цирконаты и титанаты, показали, что наименьшей растворимостью в морской воде обладают образцы титаната стронция. Это соединение используется во многих изотопных генераторах.

Практическое наличие и стоимость изотопа могут оказать существенное влияние на его выбор. В табл. 7.3 приведены данные о стоимости и производстве изотопов в США в настоящее время и в будущем. Данные, относящиеся к 1980 г., вычислены в предположении, что радиоактивные изотопы будут производиться только в энергетических реакторах АЭС США, электрическая мощность которых к 1980 г. достигнет 150 000 *Мвт* [6].

Таблица 7.3

Данные о стоимости и производстве радиоактивных изотопов

Изотоп	Производство в 1968 г., <i>квт(т)</i>	Производство в 1980 г., <i>квт(т)/год</i>	Стоимость в 1968 г., <i>долл/вт(т)</i>	Стоимость к 1980 г., <i>долл/вт(т)</i>
Кобальт-60	—	Более 1000	26	10
Стронций-90	67	850	30	20
Цезий-137	48	850	26	24
Церий-144	800	10000	19	2
Прометий-147	5,5	40	558	220
Полоний-210	14	—	780	20
Плутоний-238	17	Более 400*	1600	540
Кюрий-242	—	—	—	17
Кюрий-244	—	292*	—	64

* 400 *квт* плутония-238 будет получено при облучении нептуния-237, количество которого к 1980 г. достигнет 920 *кг*.** 29 *квт* кюрия-244 будет получено из топлива энергетических реакторов и 100 *квт* при переработке плутония и америция. К 1980 году предполагается получить 118 *кг* америция-241 из топлива энергетических реакторов.

Как указывалось, радиоактивные изотопы получают в основном в ядерном реакторе в процессе деления топлива (продукты деления) и при облучении нейтронами некоторых тяжелых элементов. Производство продуктов деления почти пропорционально росту производства ядерной энергии. Количество изотопов, получаемых при облучении нейтронами, зависит от количества загружаемого исходного материала (мишени), длительности его выдержки и интенсивности использования ядерного топлива.

Предполагаемый рост производства радиоактивных изотопов в реакторах с водяным охлаждением на тепловых нейтронах США показан на рис. 7.1.

Изотопы, получаемые в процессе деления, являются побочным продуктом атомной промышленности, поэтому стоимость реакции деления не влияет на их стоимость. Цена на продукты деления определяется в основном затратами на радиохимическую переработку отходов атомной промышленности.

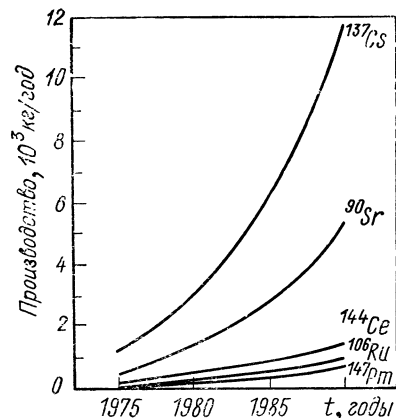


Рис. 7.1. Количество изотопов — продуктов деления, которое можно ежегодно получать в энергетических реакторах.

Вторая группа изотопов характеризуется значительно более высокой стоимостью, определяемой в основном ценой загружаемого вещества — мишени, величиной потока нейтронов и затратами на выделение полученного изотопа. В табл. 7.4 приведены примерные затраты на облучение мишеней в реакторе [7].

При использовании радиоактивных изотопов в качестве источников тепловой энергии стоимость генерируемого тепла зависит от длительности срока службы этих источников. Примерная зависимость стоимости энергии для различных изотопов от срока службы генератора приведена в табл. 7.5. При этом стоимость изотопов определялась с учетом усовершенствованной технологии их выделения и упаковки [7].

В табл. 7.6 приведены данные о выходе изотопов, образующихся в реакторе в результате облучения нейтронами. Эти данные являются средними значениями для реакторов с водой под давлением и кипящих реакторов. При оценке полных затрат для тех процессов,

Таблица 7.4

Относительные расходы на облучение мишеней в реакторе

Изотоп	Исходное вещество — мишень	Стоимость облучения, % полной
Кобальт-60	Кобальт-59	25—90
Полоний-210	Висмут	1—9
Плутоний-238	Нептуний-237	5—12
Кюрий-242 + плутоний-238	Америций-241	2—7
Кюрий-244 + плутоний-238	Америций-241 + америций-242	2—8

у которых имеется только частичный выход продукта и процесс может повторяться несколько раз, следует учитывать ежегодное снижение цен примерно на 10%.

Таблица 7.5

Зависимость стоимости энергии от срока службы генератора, долл/(квт·ч) (т)

Изотоп	Период полураспада, годы	Срок службы, годы					Цена чистого изотопа с упаковкой, долл/г
		0,5	1	3	5	10	
Кобальт-60	5,25	1,5	0,8	0,34	0,27	—	106
Стронций-90	28,4	4,95	2,5	0,85	0,55	0,31	20
Церий-144	0,78	0,7	—	—	—	—	50
Цезий-137	30	5,6	2,8	0,95	0,62	0,35	10
Прометий-147	2,6	60,0	34,0	19,0	—	—	75
Полоний-210	0,38	4,4	—	—	—	—	1010
Плутоний-238	86,4	99,0	50,4	16,9	10,4	5,4	242
Кюрий-242	0,45	1,1	—	—	—	—	252*
Кюрий-244	18	54,6	27,8	9,82	6,5	3,95	612*

* Кюрий-242 и 244 образуются вместе с плутонием-238, при этом цена плутония-238 принята равной 119 долл/г.

Таблица 7.6

Выход изотопов при облучении в реакторах

Изотоп	Вещество и масса мишени	Длительность технологического процесса	Поток нейтрон (см ² ·сек)	Выход	
				изотоп, г	непрореагировавшая часть мишени, г
Кобальт-60	⁵⁹ Co (100 г)	Облучение 1 год	2·10 ¹³	1,6 (кобальт-60)	—
		Облучение 3 года	1·10 ¹⁴	4,2 (кобальт-60)	—
Полоний-210	Висмут (1 т)	Облучение 1 год	2·10 ¹³	4 (полоний-210)*	—
		Облучение 1 год	1·10 ¹⁴	17 (полоний-210)*	—
Плутоний-238	Нептуний-237 (100 г)	Облучение 3 года	2·10 ¹³	20 (плутоний-238)	71 (нептуний-237)
		Облучение 9 мес.	1·10 ¹⁴	21 (плутоний-238)	70 (нептуний-237)
		Облучение 1 год (выделение 4 мес.)	2·10 ¹³	6,0 (кюрий-242)	62 (америций-241)
Кюрий-242 + плутоний-238	Америций-241 (100 г)	Облучение 4 мес.	1·10 ¹⁴	18,0 (плутоний-238)	—
		Облучение 4 мес. (выделение 4 мес.)	—	15 (кюрий-242)	50 (америций-242)
				23 (плутоний-238)	

* В момент выгрузки.

Конструктивные особенности изотопных термогенераторов

Введение. Назначение генератора может налагать очень жесткие ограничения на его конструкцию. Так, корпус генератора, предназначенного для работы на больших глубинах, должен быть рассчитан на внешнее давление в несколько сот атмосфер. Конструкция космического генератора должна выдерживать значительные вибрационные и ударные нагрузки, характерные для ракетных систем. Даже наземные установки необходимо рассчитывать на удары, которые могут возникнуть при монтаже и транспортировке. Требования

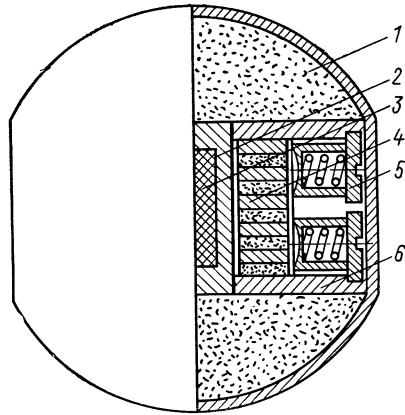


Рис. 7.2. Типичный изотопный термогенератор (разрез):

1 — теплоизоляция; 2 — корпус теплового блока; 3 — топливо; 4 — термоэлементы; 5 — прижимное устройство; 6 — изолирующая прокладка.

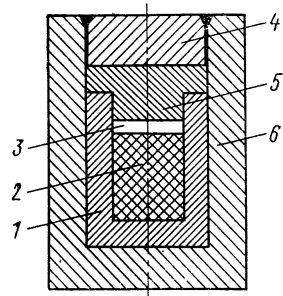


Рис. 7.3. Тепловой блок:

1 — ампула с изотопом; 2 — топливо; 3 — пространство для сбора газа; 4 — крышка блока; 5 — пробка; 6 — корпус блока.

радиационной безопасности, заключающиеся в том, чтобы изотопный генератор оставался неповрежденным при любой аварии, существенно влияют на его конструкцию. Механические, тепловые и химические силы, возникающие при эксплуатации генератора и особенно в результате аварии, определяют в основном конструкцию топливной ампулы. Конструкция защиты определяется ядерными характеристиками и типом излучения радиоизотопного топлива. Неизменная скорость распада изотопа, подчиняющаяся экспоненциальному закону, также вносит определенные конструктивные ограничения, требуя в некоторых случаях создания специальных систем регулирования мощности. Ниже рассматриваются наиболее характерные особенности радиоизотопных термоэлектрических генераторов. Взаимное расположение узлов конструкции типичного изотопного генератора показано на рис. 7.2.

Тепловой блок. Источник тепловой энергии термогенератора — радиоизотопное топливо — заключен в специальную

ампулу (рис. 7.3). Несколько таких ампул помещают в контейнер (тепловой блок). Идеальной формой теплового блока в отношении равномерности распределения тепла является сфера. Однако сферические формы сложны в изготовлении. Кроме того, большинство радиоизотопных топлив не могут обеспечить высокие тепловые потоки, необходимые для термоэлектрической системы, окружающей сферический блок. По этим причинам большинство тепловых блоков изготавливают в форме цилиндра, к боковой или торцевой поверхностям которого прижимаются горячие спаи термоэлементов. У некоторых генераторов (например, первые отечественные генераторы на полонии-210) тепловой блок изготовлен в форме плоского параллелепипеда.

Во избежание возможности попадания радиоактивного изотопа в биосферу тепловой блок не должен разрушаться ни при каких условиях эксплуатации, а также в результате аварийных ситуаций, приводящих к разрушению самого генератора. Особенно жесткие требования предъявляют к теплому блоку изотопного термогенератора космического назначения. Подобный генератор может подвергаться кратковременному тепловому воздействию в результате пожара на стартовой площадке или аэродинамического нагрева при возвращении в плотные слои атмосферы. При этом максимальная температура может возрастать до $1500\text{--}1800^\circ\text{C}$. В случае аварийного прекращения полета ракеты-носителя генератор может упасть на твердый грунт (максимальная скорость падения 100 м/сек) или погрузиться в океан на глубину, где гидростатическое давление составляет $500\text{--}700\text{ атм}$. При попадании в океан тепловой блок будет подвергаться также коррозионному воздействию морской воды.

При перевозке генератора к месту испытаний или в процессе эксплуатации может возникнуть пожар в результате аварии на транспорте. Поэтому имеется определенная, хотя и небольшая, вероятность возникновения высоких температур, характерных для пламени бензина. Пламя горящего бензина не может существенно повлиять на тепловой блок космического генератора, рассчитанного на более высокие температуры (например, вспышка ракетного топлива). Для наземных генераторов горение бензина в результате дорожного происшествия становится предельно возможным тепловым воздействием окружающей среды, которое должно быть учтено при их конструировании.

Происшествия на транспорте могут привести также к значительным перегрузкам и взрывам. При лобовом ударе грузовых автомашин эффективная скорость столкновения может достигать 60 м/сек . Максимальная скорость при столкновении товарных поездов достигает $80\text{--}90\text{ м/сек}$. Опасность, связанную с возможностью взрыва цистерн с бензином на железнодорожном транспорте, можно устранить соответствующим комплектованием состава. Наиболее опасные транспортные происшествия — авиационные катастрофы. Пламя горящего авиационного бензина серьезно повредит генера-

тор, но целостность теплового блока при этом не должна быть нарушена. Тепловой блок должен также противостоять удару при скоростях до 100 м/сек в случае аварии самолета и падения генератора с большой высоты, например, на скальный грунт. Поэтому на практике следует избегать воздушной транспортировки наземных изотопных генераторов.

Помимо внешних сил на тепловой блок действуют внутренние силы, обусловленные давлением газа и коррозией при высоких рабочих температурах. У α -активных источников в результате захвата электронов α -частицами образуется гелий, который постепенно выходит из материала топлива и создает давление на стенки ампулы. По мере распада изотопа давление гелия в ампуле может достигать нескольких сот атмосфер. Для поддержания этого давления в допустимых пределах обычно в ампуле предусматривается объем для сбора гелия.

В некоторых случаях указанный объем может в несколько раз превышать объем топлива. Например, ампула кюриевого источника со сроком службы один год и тепловой мощностью 500 Вт должна иметь объем для сбора гелия под давлением 100 атм порядка 25 см³, что в пять раз больше объема топлива (4—5 см³) [8]. Наличие таких объемов существенно снижает удельную мощность топлива и отрицательно влияет на вес и габаритные размеры генератора. Поэтому ампулы с α -активными изотопами рассчитывают на давление в несколько сот атмосфер. Однако ампула не должна иметь очень толстые стенки, поскольку это снижает ее тепловые характеристики и существенно увеличивает вес генератора. Эти две противоречивые тенденции ставят перед конструктором генератора задачу нахождения оптимального решения применительно к каждой конкретной конструкции.

β -Активные источники в принципе также могут выделять газообразные продукты в результате радиохимических реакций, обусловленных наличием примесей в топливе. Например, окись церия в процессе радиоактивного распада выделяет кислород, часть которого может выйти из топлива. Поэтому при разработке ампул для β -активных изотопов необходимо также учитывать возможность накопления газов.

Существенную роль играют химические силы, возникающие в результате реакции между топливом и материалом ампулы и приводящие к коррозии внутренних стенок ампулы. Эта задача успешно решается правильным подбором материала ампулы и стабильной химически инертной формы радиоизотопного топлива.

В табл. 7.7 приведены некоторые наиболее часто употребляемые конструктивные материалы топливной ампулы и теплового блока и их характеристики. При использовании в качестве топлива металлических плутония и кюрия в ампулы обычно вставляется оболочка из инертного металла для предотвращения взаимодействия топлива с конструктивными материалами. Чаще всего для этой цели используется тантал.

Таблица 7.7

Конструктивные материалы топливной ампулы

Материал	Максимальная рабочая температура, °C	Коррозионная стойкость в морской воде	Свариваемость
Молибден	1350	Хорошая	Хорошая
Никель	820	Хорошая	То же
Титан	650	Очень хорошая	»
Нержавеющая сталь 304	820	Слабая	»
Хастеллой-С	820	Очень хорошая	»
Инконель-Х	930	То же	»
Рене-41	930	Хорошая	Очень хорошая
Хейнес-25	930	То же	Хорошая

Радиоактивный изотоп обычно помещают в цилиндрическую ампулу (см. рис. 7.2), а затем — в металлический тепловой блок и герметизируют колпачком на резьбе с последующей его обваркой. Полоний-210, имеющий значительную летучесть и дающий наибольшие выделения гелия, заключают последовательно в две ампулы с окончательной герметизацией в металлическом блоке. Следует отметить, что в некоторых изотопных термогенераторах применялись ампулы конической формы, чтобы обеспечить плотные контакты с малыми температурными сопротивлениями. Однако более поздние эксперименты показали, что конусообразная форма не обязательна. Иногда обеспечение хорошего теплового контакта с более холодными узлами достигается использованием жидкометаллической прослойки, но применять этот способ вблизи топливной ампулы не удастся из-за слишком высокой ее температуры.

Термоэлектрический преобразователь. Термоэлектрические элементы обычно располагаются между тепловым блоком (горячая сторона) и корпусом генератора (холодная сторона). Термоэлементы, как правило, находятся в непосредственном тепловом контакте с поверхностью теплового блока, если отсутствуют какие-либо специальные требования к защитному экрану. В качестве системы для сброса остаточного тепла часто используется корпус генератора. На рис. 7.4 показана одна из возможных конструкций термоэлемента.

Достижение оптимальных эксплуатационных характеристик генератора в значительной степени зависит от надежно работающего

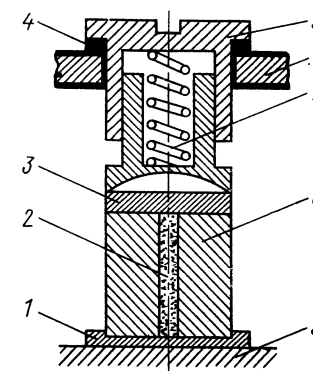


Рис. 7.4. Конструкция термоэлемента:

1 — электронизация; 2 — теплоизоляция; 3 — коммутационная пластина; 4 — уплотнение; 5 — прижимное устройство; 6 — корпус генератора; 7 — пружина; 8 — термостолбик; 9 — корпус теплового блока.

тепловое контакта термоэлемента с горячей и с холодной поверхностями. Хороший тепловой контакт можно получить с помощью твердых припоев. Однако в этом случае конструкция становится жесткой, что может привести к разрушению термоэлементов или коммутации в результате термических напряжений, обусловленных температурными градиентами. Поэтому в некоторых генераторах термоэлементы прижимаются к тепловому блоку с помощью пружинящих элементов конструкции.

Хороший тепловой контакт может быть обеспечен также использованием жидкого припоя, но при этом необходимо предусмотреть меры, препятствующие утеканию или испарению припоя при длительной эксплуатации установки. Важной характеристикой преобразователя (влияющей на его конструкцию) является стойкость термоэлектрического материала к окислению и сублимации при высоких рабочих температурах. К числу наиболее распространенных термоэлектрических материалов, используемых в высокотемпературных изотопных генераторах, относятся теллурид свинца и кремний-германиевый сплав. Термоэлектрические и механические свойства этих материалов достаточно хорошо изучены (см. гл. 4). Элементы из теллурида свинца широко использованы в генераторах типа СНАП-3 и СНАП-7. Испытания этих установок показали, что термоэлектрические характеристики теллурида свинца падают в процессе эксплуатации из-за его окисления (при температурах выше 300° С) и сублимации (при 500° С и выше). Для предотвращения окисления и сублимации поверхность термоэлемента из теллурида свинца покрывают герметизирующими материалами, такими, как окись циркония, окись алюминия и другими, или заключают элементы в ампулы с инертной атмосферой.

Элементы из кремний-германиевого сплава впервые были применены в отечественных изотопных источниках тока на полонии-210 (см. § 7.5). Кремний — германий имеет довольно высокую теплопроводность, поэтому его коэффициент эффективности ниже, чем у других известных материалов. Однако он обладает хорошей механической прочностью и высокой (900—1000° С) рабочей температурой, что делает его конкурентоспособным для использования в космических установках. В последнее время появились сообщения о разработке каскадных термоэлементов на основе SiGe — PbTe, имеющих более высокие термоэлектрические характеристики. Однако данные относительно этих характеристик и срока службы термоэлементов ограничены.

Теплоизоляция. В действующих конструкциях изотопных термогенераторов секция преобразования занимает лишь часть поверхности теплового блока, остальная поверхность закрыта теплоизоляцией. Теплоизоляция располагается также в зазорах между термоэлементами. В хорошей конструкции генератора термоэлементы должны занимать максимальную поверхность теплового блока, а площадь, закрываемая теплоизоляцией, должна быть минимальной. Поскольку теплоизоляция шунтирует тепловой поток,

проходящей через термоэлементы, она должна иметь очень низкую теплопроводность. Кроме того, изоляционный материал должен обладать хорошей механической прочностью и радиационной стойкостью. В некоторых установках (например, типа «Бета») теплоизоляция выполнена в виде металлических пластин, пространство между которыми заполнено инертным газом.

В табл. 7.8 приведены коэффициенты теплопроводности термоизоляционных материалов, используемых в конструкциях отечественных изотопных генераторов.

Таблица 7.8
Теплопроводность изоляционных материалов, используемых в отечественных термогенераторах [9]

Материал	Коэффициент теплопроводности, $вт/(м \cdot град)$
Изоляция на основе перлитов при рабочей температуре 150° С	0,05
Изоляция на основе аэрогелей, стеклянной и минеральной ваты	0,025—0,04
Газоэкранный изоляция	0,015—0,02

В конструкциях американских изотопных генераторов используются в основном термоизоляционные материалы, разработанные фирмами «Джонс Менсвилл» и «Оуэнс Корнинг Фибергласс». Характеристики этих материалов приведены в табл. 7.9. Наиболее часто используемый теплоизоляционный материал — изоляция типа Мин-К, которая применена в установках типа СНАП. Эта изоляция состоит из кварцевой пудры, асбестового волокна, двуокиси титана и фенольного биндера. За последнее время разработана новая изоляция следующего состава: кварцевая пудра (размер частиц менее 1 мкм) — 75 вес. %, кварцевое волокно — 4 ÷ 8 вес. %, двуокись титана (размер частиц до 5 мкм) — 16 вес. %. Удельный вес материала 320 кг/м³, коэффициент теплопроводности на воздухе при 316° С и давлении 1 атм 0,03 вт/(м · град), в среде аргона при давлении 1 атм — 0,026 вт/(м · град) и в вакууме — 0,016 вт/(м · град).

Таблица 7.9
Характеристики изоляционных материалов американских термогенераторов [4]

Материал	Коэффициент теплопроводности, $вт/(м \cdot град)$		Максимальная рабочая температура, °К
	в воздухе	в вакууме	
Мин-К 1301	0,032	0,022	980
Мин-К 501	0,022	0,11	530
Мин-К 200	0,053	0,042	1365
Стекловолокно (AA-1200)	0,064	0,058	920

Изоляция слабо поглощает газы и практически не взаимодействует с термоэлектрическим материалом [10].

Следует заметить, что некоторые пористые термоизоляционные материалы поглощают значительные количества газов. Последние, выделяясь в процессе эксплуатации, ухудшают термоэлектрические характеристики термоэлементов. В этом отношении особенно нежелателен кислород. В процессе предварительного вакуумирования генератора СНАП-9А были обнаружены кислород, водород, метан и этан. Проверка показала, что источником газовыделения оказалась изоляция типа Мин-К [4]. Поэтому при выборе термоизоляционных материалов предпочтительнее те, которые могут быстро обезгаживаться.

По данным Г. М. Фрадкина и др. [1], термоизоляционные материалы, используемые в современных конструкциях изотопных генераторов, позволяют снизить непроизводительные потери тепла через изоляцию, минуя термоэлектрический преобразователь, до 10—15%.

К о р п у с г е н е р а т о р а. Связующее звено между преобразователем и окружающей средой — корпус генератора, выполняющий несколько функций. Он может отводить отработанное тепло от секции преобразователя и рассеивать его в окружающее пространство, которое в данном случае играет роль холодильника тепловой машины. Корпус защищает тепловой блок, преобразователь и другие внутренние элементы от воздействия внешней среды, а в случае заполнения полости генератора инертным газом обеспечивает ее герметичность. Корпус используется как составной элемент в системе регулирования мощности, является предварительным барьером для тепловых и химических воздействий на генератор в случае аварии и т. п. Обычно корпус генератора изготавливается из легких материалов, поскольку он имеет относительно низкие рабочие температуры и не играет существенной роли в обеспечении радиационной безопасности.

Тепло, прошедшее через корпус генератора, может быть передано путем излучения и конвекции воде, воздуху и твердому телу (почва, лед) или через излучение — в космическое пространство. При низких уровнях электрической мощности (10—15 Вт) поверхность корпуса может быть гладкой, а при мощности выше 20 Вт используется излучатель с оребренной поверхностью. Оребренным корпусом снабжаются также и крупные наземные генераторы для увеличения эффективной поверхности теплообмена.

Плотность теплового потока, отводимого от современных изотопных термогенераторов, находится в пределах 1000—3000 Вт/м² [11]. Такой сравнительно низкий тепловой выход не вызывает заметного увеличения температуры окружающей среды, поэтому обеспечение необходимого теплоотвода у наземных установок не представляет серьезной проблемы. Напротив, отвод тепла излучением у генераторов космического назначения является довольно сложной инженерно-технической задачей.

Теплоотвод лучеиспусканием описывается законом Стефана — Больцмана

$$Q = \varepsilon \sigma S (T_r^4 - T_x^4), \quad (7.2)$$

где Q — излученное тепло, Вт; ε — излучательная способность поверхности; σ — постоянная Стефана — Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·град); S — эффективная площадь излучающей поверхности, м²; T_r — эффективная температура поверхности генератора, °К; T_x — температура окружающей среды, °К. В уравнении (7.2) рассматриваются эффективные площади и температуры, поскольку излучатель может быть оребренным и температура поверхности может меняться от точки к точке.

Согласно уравнению (7.2) для эффективного отвода тепла необходимо, чтобы излучатель имел либо очень высокую температуру, либо значительную площадь. Но максимальные значения эффективности известных термоэлектрических материалов лежат в низкотемпературной области. Поэтому при разработке конструкции генератора приходится искать компромисс между этими двумя взаимоисключающими тенденциями. Кроме того, в космосе излучения Солнца и Земли увеличивают среднюю температуру окружающей среды.

Увеличение эффективности теплоотвода в космических генераторах обычно достигается применением специальных материалов (краски, эмали) для покрытия поверхности излучателя. При разработке таких материалов желательно обеспечить высокую излучательную способность поверхности в инфракрасной области (500—1200°С) и низкий коэффициент поглощения в области спектра солнечного излучения (максимум излучения соответствует температуре 12500°С).

Характеристики материалов, которые могут быть использованы для покрытия излучателей, приведены в табл. 7.10. Нижняя температура 562°С соответствует температуре внешней оболочки космического корабля, а верхняя температура 1250°С относится к радиатору сбросного тепла преобразователя энергии [11]. Как видно из таблицы, для излучения тепла при низких температурах (500—600°С) подходящими материалами являются порошок двуокиси титана, плавленая окись кремния, белая эпоксидная краска и стекло, напыленное на алюминий. Для высоких температур могут быть использованы черные покрытия в виде анодированных металлов, имеющих высокий коэффициент излучения.

Система регулирования мощности. Важная особенность изотопных источников — экспоненциальный спад тепловой мощности по мере распада изотопа. На рис. 7.5 показано изменение тепловой мощности со временем для некоторых радиоактивных изотопов, используемых в качестве источников тепла. Тепловая мощность короткоживущих изотопов (полоний-210, кюрий-242, церий-144) падает довольно быстро. Так, мощность генераторов на полонии-210 и кюри-242 через 3—4 месяца уменьшится более чем

Таблица 7.10

Характеристики материалов покрытий для отвода тепла излучением (облучались потоком солнечной энергии порядка 300 вт/м^2 за пределами земной атмосферы) [11]

Материал	$T = 562^\circ \text{C}$		$T = 1250^\circ \text{C}$	
	ε	α	ε	α
Черная эпоксидная краска (каталак черный на алюминии)	0,89	0,95	0,92	0,95
Черная силиконовая краска, обожженная при 1770°C в течение 20 мин	0,94	0,94	0,92	0,94
Графит на силикате натрия	0,91	0,96	0,93	0,96
Окисленная нержавеющая сталь (черный окисел армко на стали 301)	0,75	0,89	0,76	0,90
Твердоанодированный алюминий 6061-T6 толщиной 0,025 мм	0,84	0,92	0,85	0,93
Анодированный титан	0,84	0,51	0,83	0,51
Мягкоанодированный алюминий	0,79	0,23	0,44	0,23
Стекло, напыленное на алюминий	0,83	0,13	0,82	0,13
Порошок двуокиси титана толщиной 0,051 мм	0,88	0,15	0,90	0,15
Окись алюминия, нанесенная в пламени на нержавеющую сталь 410 и нагретая в течение 1 мин до 700°C , с выдержкой при этой температуре в течение 30 сек	0,80	0,28	0,79	0,28
Плавляная окись кремния, спеченная	0,84	0,08	0,85	0,08
Белая эпоксидная краска (каталак белый на алюминии)	0,88	0,25	0,91	0,24

Примечание. ε — коэффициент излучения поверхности; α — коэффициент поглощения внешнего излучения.

* Средний поток солнечной радиации на цилиндрический или сферический радиатор, направленный на Солнце.

в два раза, а электрическое питание потребителя (например, электронной аппаратуры) должно быть постоянным во времени. Отсюда возникает необходимость регулирования мощности таким образом, чтобы через термоэлементы проходил постоянный тепловой поток в течение всего срока службы генератора.

Разработано несколько способов регулирования мощности, основанных на различных принципах. Некоторые из этих способов приведены ниже.

Тепловой поток от источника тепла пропускается через специальные окна, которые постепенно закрываются с помощью механического устройства (рис. 7.6). Система состоит из резервуара с жидким металлом (NaK-78), укрепленного на тепловом блоке, шарнирно-поршневого механизма, двух створок и вспомогательного излучателя. Резервуар с NaK-78 имеет тепловой контакт с изотопной ампулой, и изменение температуры последней передается резервуару, что в свою очередь вызывает расширение или сокращение сильфона

и перемещение прикрепленного к нему поршня. Движение поршня с помощью рычажного механизма передается подвижным шторкам. Система отрегулирована таким образом, что в начальный период работы, когда тепловой блок дает избыточное количество тепла, шторки полностью открыты и избыток тепла сбрасывается излучением. К концу срока службы мощность источника падает, и шторки закрываются. Внутренняя поверхность шторок покрыта благородным металлом, хорошо отражающим тепловое излучение. Это делается для снижения тепловых потерь, когда шторки находятся в закрытом положении. Слабое звено этой системы регулирования — механическая рычажная передача, которая снижает надежность работы генератора. Аналогичная система применена в генераторе СНАП-11.

Полость генератора заполняют инертным газом, который служит тепловым шунтом. Газ медленно вытекает через небольшое отверстие, постепенно увеличивая тем самым термическое сопротивление шунта. Этот принцип использован в установке СНАП-3В.

Поверхность излучателя покрывают сублимирующим материалом с высокой излучательной способностью. По мере сублимации покрытия излучательная способность генератора падает. При этом можно подобрать такое покрытие, скорость сублимации которого соответствовала бы скорости распада изотопа.

Если в качестве топлива используются долгоживущие изотопы (плутоний-238, кюрий-244, стронций-90), необходимость в системе регулирования мощности практически отсутствует.

Защита от излучений. Опасность биологического воздействия радиоактивных изотопов на организм определяется следующими основными факторами: прямое облучение проникающим излучением, испускаемым источником; попадание радиоактивного вещества внутрь организма в результате вдыхания или заглатывания.

Прямое облучение в общем случае менее опасно, поскольку почти всегда можно создать необходимую защиту. Изотопные генераторы должны быть оборудованы радиационной защитой того или иного типа, ослабляющей излучение изотопа до допустимых уровней дозы. Доза облучения может изменяться в зависимости от назначения генератора и характера его эксплуатации. Однако все изотопные генераторы должны удовлетворять правилам Между-

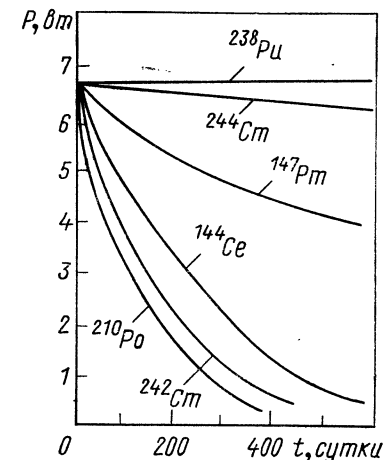


Рис. 7.5. Зависимость тепловой мощности от времени.

народной коммерческой комиссии на транспортировку радиоактивных материалов. Эти правила сводятся к ограничению мощности дозы облучения до 200 мр/ч на поверхности транспортного контейнера и до 3 мр/ч на расстоянии 1 м от его поверхности [4].

Большинство α -излучателей не требует специальной защиты. α -Частицы, возникающие в результате ядерных превращений,

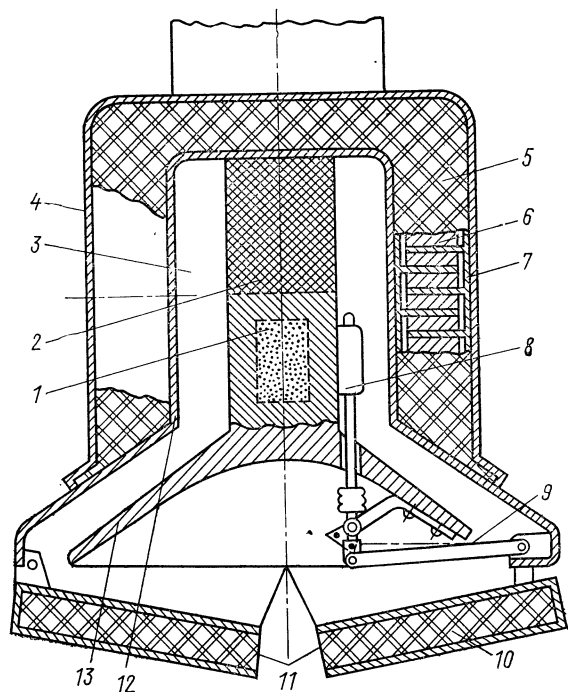


Рис. 7.6. Система регулирования мощности изотопного генератора:

1 — топливо; 2 — защита; 3 — вакуумное пространство; 4 — основной излучатель; 5 и 10 — теплоизоляция; 6 — термоэлементы; 7 — электроизоляция; 8 — резервуар с NaK-78; 9 — приводной механизм; 11 — заслонки терморегулятора (частично открыты); 12 — корпус генератора; 13 — вспомогательный излучатель.

полностью поглощаются стенками топливной ампулы. α -Распад обычно сопровождается испусканием γ -квантов и нейтронов. Нейтроны образуются при взаимодействии α -частиц высоких энергий с ядрами в результате (αn)-реакций. Эти реакции возникают в боре, бериллии, кислороде и других легких элементах, присутствующих в топливе как примеси. Например, среднее число нейтронов, образующихся в полониевом топливе из-за наличия примесей, достигает 100—200 нейтрон/(сек·кюри). Это обстоятельство налагает определенные требования на чистоту изотопного топлива. Энергия

γ -квантов, опускаемых при α -распаде, сравнительно невелика (см. табл. 7.1).

Нейтроны и γ -кванты образуются также при спонтанном делении элементов более тяжелых, чем торий-232. В этом случае поток нейтронов слабо меняется с течением времени, но интенсивность γ -излучения может возрасти до значительных уровней по мере накопления продуктов деления. На рис. 7.7 приведена зависимость мощности дозы от тепловой мощности источника, полученная в работе [4]. Значения мощности дозы вычислены для расстояния 1 м от центра топливной ампулы с учетом самопоглощения в топливе и в стенках ампулы. Кривые построены для трех наиболее важных изотопов: плутония-238, кюрия-244 и стронция-90. Данные по β -активному стронцию-90 приведены для сравнения.

Из рис. 7.7 можно сделать следующие выводы: во-первых, плутоний-238 практически не требует защиты; во-вторых, кюрий-244 испускает большое количество нейтронов при спонтанном делении, которые дают более высокие мощности дозы, чем γ -излучение. В этом случае может возникнуть необходимость в защите от нейтронного излучения. В табл. 7.11 приведены характеристики некоторых спонтанно делящихся изотопов.

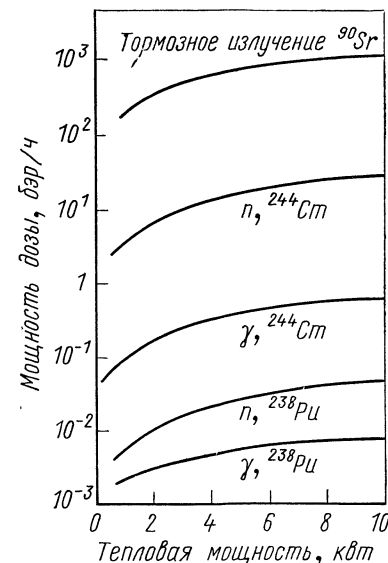


Рис. 7.7. Зависимость дозы от тепловой мощности источника.

β -Частицы, так же, как и α -частицы, практически полностью поглощаются стенками топливной ампулы. Вторичное γ -излучение, сопровождающее β -распад, не представляет серьезной проблемы в отношении защиты, поскольку его интенсивность очень мала, хотя энергия достигает 2 Мэв (например, у продуктов распада цезия-144). Существенную биологическую защиту требует тормозное γ - и рентгеновское излучения, возникающие в процессе замедления β -частиц в веществе электрическими полями его атомов. Максимальная энергия тормозного излучения очень близка к энергии тормозящихся β -частиц.

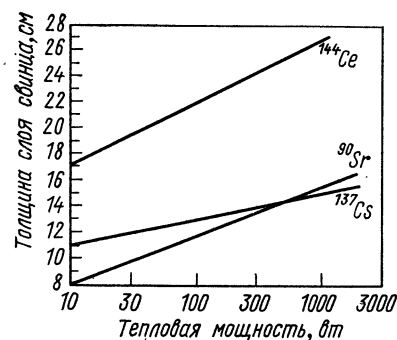
На рис. 7.8 приведена зависимость толщины защиты от тепловой мощности различных β -излучателей. Кривые рассчитаны в предположении, что точечные источники окружены свинцом и мощность дозы за защитой на расстоянии 1 м от точечного источника 10 мбэр/ч [4]. Эти кривые иллюстрируют примерные требования к защите для различных β -активных источников тепла.

Таблица 7.11

Характеристики источников нейтронов спонтанного деления

Изотоп	Период спонтанного деления, годы	Число нейтронов на одно деление	Удельный выход нейтронов, нейтрон/(мг·сек)
Плутоний-238	10^{10}	2,0	2,2
Кюрий-242	$7,6 \cdot 10^6$	2,3	$1,7 \cdot 10^4$
Кюрий-244	$1,4 \cdot 10^7$	2,8	$8 \cdot 10^3$
Калифорний-252	2,2	3,8	$2,7 \cdot 10^9$

Защита изотопных генераторов наземного назначения, как правило, располагается за корпусом генератора и используется в качестве транспортного контейнера. Ее вес достигает нескольких сот килограммов. Наилучшими материалами для защиты от γ -излучения являются обедненный уран, вольфрам и свинец, а от нейтронного излучения — водородсодержащие соединения, бериллий и другие материалы с низким атомным весом. В космических генераторах,

Рис. 7.8. Зависимость толщины защиты от тепловой мощности β -излучателей.

когда требуется снизить дозу облучения для некоторых особенно чувствительных узлов электронного оборудования, используется теньевая защита. К таким узлам относятся германиевые и кремниевые транзисторы, кремниевые диоды, бумажные конденсаторы и другие компоненты электроники, способные удовлетворительно работать при дозе не выше 10^6 — 10^7 p по γ -излучению и плотности интегрального потока 10^{12} — 10^{15} нейтрон/см² [4].

Попадание радиоактивного изотопа внутрь организма наиболее опасно с точки зрения биологического воздействия. Оно может произойти либо в случае аварии генератора и разрушения топливной ампулы, либо при нарушении нормальных условий эксплуатации (например, при входе генератора космической установки в атмосферу). Поэтому конструкция топливной ампулы и теплового блока должна обеспечивать полное удержание радиоактивного изотопа при любых обстоятельствах. Если же полное удержание невозможно, то должно быть обеспечено разбавление изотопа до концентраций, не превышающих допустимого уровня.

Такое разбавление возможно лишь в атмосфере или в океане, поскольку только две среды (стратосфера и глубинные воды морей)

имеют области, в которых радиоактивный изотоп может находиться в течение длительного времени, прежде чем попадет в биосферу. Среднегодовые допустимые концентрации радиоактивных изотопов в воде и воздухе, а также максимально допустимое содержание их в организме даны в табл. 7.12.

Таблица 7.12

Среднегодовые допустимые концентрации α - и β -излучателей [12]

Изотоп	Питьевая вода, кюри/л	Воздух населенных пунктов, кюри/л	Максимально допустимое содержание в организме, мккюри
Кобальт-60	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-13}$	13
Стронций-90	$4 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-14}$	2
Цезий-137	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-13}$	30
Церий-144	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-13}$	1,7
Прометий-147	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-12}$	31
Тулий-171	10^{-7}	$4 \cdot 10^{-12}$	73
Полоний-210	$7,3 \cdot 10^{-10}$	$7 \cdot 10^{-15}$	0,04
Плутоний-238	$5 \cdot 10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-17}$	0,04
Кюрий-242	$2,3 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-15}$	0,18
Кюрий-244	$7,3 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-16}$	0,14

Наиболее существенную и дорогостоящую часть программы разработки радиоизотопного генератора составляют его испытания. Можно предсказать общие характеристики того или иного элемента конструкции, но определить реальные физические параметры нового узла или системы в целом часто удается только экспериментально.

§ 7.4

Наземные изотопные термогенераторы

Введение. Первые наземные радиоизотопные генераторы разработаны для питания аппаратуры автоматических радиометеорологических станций. До последнего времени основным источником питания таких станций были кадмиево-никелевые батареи с подзарядкой от ветроэлектрического двигателя. Эти двигатели нормально работают при скоростях ветра более 3 м/сек. Однако сильные порывы ветра для них нежелательны из-за возможного повреждения механической части оборудования. В связи с этим ветроэлектрические двигатели оказываются непригодными в районах длительного безветрия и зонах ураганных ветров. Применение химических батарей без подзарядки требует большого количества этих батарей и частой их замены, что сокращает срок службы и надежность работы метеорологической станции. Весьма привлекательным ока-

залось использование для этих целей радиоизотопных термогенераторов, обладающих большой энергоемкостью, длительным сроком службы и высокой надежностью. Эти генераторы успешно работают на многих автоматических метеорологических станциях Земного шара.

Другая область применения наземных радиоизотопных генераторов — подводные установки, используемые для научно-технических, военных и других целей. Впервые в этой области радиоизотопы были применены для контроля движения прибрежных песков под действием морских волн, а затем для изучения скоростей потоков подводных течений, их направлений, условий перемешивания слоев воды на различных глубинах. Позднее были начаты работы по определению возможности использования изотопных генераторов как источников питания аппаратуры глубоководных устройств. В частности, было показано, что радиоизотопные источники тока могут быть применены при добыче нефти для управления оборудованием, установленным на дне моря.

В этом случае требуется мощность от сотен ватт до нескольких киловатт. Такие генераторы могут снабжать электроэнергией подводные необитаемые и обитаемые станции (требуемая мощность 10—30 *квт*). Ниже рассматриваются характеристики и устройство некоторых изотопных генераторов наземного назначения.

Генераторы типа «Бета». В соответствии с программой разработки наземных изотопных термогенераторов Всесоюзным научно-исследовательским институтом радиационной техники совместно с другими организациями была начата разработка серии изотопных источников тока электрической мощностью несколько ватт, предназначенных для питания автоматических радиометеорологических станций. Установки этой серии получили название «Бета», поскольку в качестве топлива в них использовались β -активные изотопы.

Первым генератором серии «Бета» был экспериментальный образец источника тока мощностью 5,3 *вт*, работающий на цери-144 («Бета-1»). Основные характеристики установки «Бета-1» приведены в табл. 7.13.

Топливо в виде молибдата церия загружается в вольфрамовый цилиндр. Диаметр цилиндра 100 *мм*, толщина боковой стенки 20 и днища 40 *мм*. Цилиндр закрывается полусферической крышкой и помещается в два коаксиальных цилиндра, изготовленных из нержавеющей стали 1Х18Н9Т. Стальные оболочки закрываются крышками и герметизируются аргонодуговой сваркой.

Тепловая мощность источника измерялась с помощью специально изготовленного калориметра. Измеренные результаты с хорошей точностью совпали с расчетными данными, полученными с учетом тепловыделения в результате поглощения β -частиц и γ -квантов, испускаемых церием-144 и празеодимом-144. При этом не учитывались потери тепла, обусловленные тормозным излучением, поскольку

Таблица 7.13

Характеристики изотопных генераторов типа «Бета» * [1, 13]

Характеристика	«Бета-1»	«Бета-2»	«Бета-С»
Электрическая мощность, <i>вт</i>	5,3	7,3	12
Тепловая мощность, <i>вт</i>	135	148	250
К. п. д., %	4	4,9	4,8
Изотоп	¹⁴⁴ Ce	⁹⁰ Sr	⁹⁰ Sr
Топливо	Молибдат церия	Титанат стронция	Титанат стронция
Активность, <i>кюри</i>	17 500	22 000	31 000
Термоэлектрический материал:			
<i>p</i> -ветвь	Bi ₂ Te ₃ — Bi ₂ Se ₃	Bi ₂ Te ₃ — Bi ₂ Se ₃	Bi ₂ Te ₃ — Bi ₂ Se ₃
<i>p</i> -ветвь	Bi ₂ Te ₃ — Sb ₂ Te ₃	Bi ₂ Te ₃ — Sb ₂ Te ₃	Bi ₂ Te ₃ — Sb ₂ Te ₃
Температура горячего спая, °C	180	250	250
Температура холодного спая, °C	27	20	20
Вес генератора без защиты, <i>кг</i>	400	150	120
Энергоемкость, <i>квт·ч</i>	25	90	—
Срок службы, годы	1	10	10
Год пуска	1963	1964	1967

* Характеристики относятся к начальному периоду работы установок.

ку энергия этого излучения составляет 1—2% полной энергии распада и большая ее часть поглощается материалами теплового блока.

Термоэлектрический преобразователь, состоящий из 97 термопар, заключен в специальную оболочку, опирающуюся на одну из торцевых поверхностей теплового блока. Для обеспечения максимального теплового потока через преобразователь тепловой блок окружен специальными тепловыми экранами с заполнением пространства между ними инертным газом. Термоэлементы из тройных сплавов на основе висмута, сурьмы, селена и теллура имели сечение 5 × 5 *мм* и высоту 20 *мм*. Коммутация осуществлялась мягким припоем, позволяющим работать в диапазоне 300—500° C. Для предохранения от окисления горячие спаи термоэлементов покрывали тонким слоем специальной эмали.

Поддержание постоянного температурного режима термоэлектрического преобразователя обеспечивалось системой регулирования отвода тепла, состоящей из экранов и регулятора с редуктором. По мере снижения тепловой мощности источника в результате распада изотопа излучающая поверхность теплового блока уменьшается, вследствие изменения положения регулирующих экранов. Механизм теплового регулятора приводится в действие пружиной с электрическим подзапасом. Тепловой блок, термоэлектрический преобразователь и система регулирования потока тепла заключены в цилиндрический корпус.

Биологическая защита генератора состоит из двух контейнеров — рабочего и транспортного. Рабочий защитный контейнер снижает мощность дозы облучения до 1 $p/ч$, а защита транспортного контейнера — до 10 $мр/ч$ на расстоянии 1 м от генератора. Рабочий контейнер имеет съёмное оребрение из 64 прямоугольных ребер, которые позволяют обеспечить температуру холодного спая, близкую к температуре окружающего воздуха. В качестве материалов защиты использованы вольфрам и свинец. Вес генератора с рабочим контейнером 400 $кг$, а с транспортным — 1200 $кг$.

Испытания установки «Бета-1» проводились в 1963 — 1964 г. под Москвой. Генератор работал на зарядку аккумуляторной батареи емкостью 12 $а/ч$, которая питала автоматическую радиометеорологическую станцию типа АРМС-Н, работающую в импульсном режиме при напряжении 26 $в$ и токе 6 $а$. В процессе эксплуатации генератора с использованием автоматической записи контролировались такие параметры, как напряжение, ток, рабочие температуры и др. Установка работала без транспортного контейнера и поэтому была несколько заглублена в землю, чтобы снизить мощность дозы излучения.

Выходная мощность генератора составляла 5,3 $вт$. Метеорологическая станция включалась на рабочий режим через каждые два часа. При таком режиме станция проработала около двух месяцев, а затем была переведена на трехчасовой режим. В сочетании с аккумуляторной батареей генератор «Бета-1» обеспечивал работу приборов станции в импульсном режиме мощностью 160—200 $вт$. Установка непрерывно работала 8800 $ч$ (из них 4300 $ч$ в составе станции АРМС-Н) и выработала около 25 $квт\cdot ч$ электроэнергии [1]. Эксплуатация генератора прошла успешно и позволила проверить теплофизические параметры установки, эффективность биологической защиты, условия теплообмена с окружающей средой и другие характеристики. Доклад об установке «Бета-1» был представлен на III Женевскую конференцию 1964 г.

В 1964 г. разработан и изготовлен изотопный термогенератор «Бета-2» электрической мощностью 7,3 $вт$ на основе стронция-90. По своему конструктивному оформлению генератор «Бета-2» (рис. 7.9) аналогичен установке «Бета-1». Основные характеристики генератора приведены в табл. 7.13. Изотопный генератор имеет два контейнера: рабочий — цилиндрической формы, диаметром 350 $мм$ и высотой 400 $мм$ и транспортный. Вес генератора с рабочим контейнером 150 $кг$, вес транспортного контейнера без генератора 500 $кг$. Рабочий контейнер снижает мощность дозы излучений до 1 $p/ч$, а транспортный — до 10 $мр/ч$ на расстоянии 1 м от генератора, что позволяет перевозить установку любым видом транспорта. Изотопный генератор «Бета-2» имеет систему преобразования, которая обеспечивает получение напряжения до 32 $в$ и может питать различные схемы, работающие в импульсном режиме мощностью до 100 $вт$. В 1965 г. генератор «Бета-2» демонстрировался на Лейпцигской

международной ярмарке в составе автоматической метеорологической станции.

По данным Г. М. Фрадкина и др. [1], генератор «Бета-2» за время эксплуатации выработал 90 $квт\cdot ч$ электроэнергии. Термоэлектрический преобразователь проработал более 30 000 $ч$ и практически полностью сохранил свои характеристики. Эти результаты позволяют предполагать, что низкотемпературный термоэлектрический



Рис. 7.9. Изотопный термогенератор «Бета-2».

материал обеспечит возможность создания изотопного термогенератора со сроком службы 5—10 лет без обслуживания и ремонта.

Генератор «Бета-2» послужил основой для создания серии изотопных термогенераторов на стронции-90, выпуск которых начался в 1967 г. В процессе конструирования установки «Бета-2» были отработаны основные узлы серийного генератора «Бета-С» электрической мощностью 10—12 $вт$, предназначенного для питания автоматической метеорологической станции УАТГМС-3, имеющей 12 каналов информации. Основные характеристики генератора «Бета-С» приведены в табл. 7.13, а общий вид показан на рис. 7.10. В 1967 г. изготовлено три генератора указанного типа, у которых вес конструкции снижен до 120 $кг$. Один из таких генераторов эксплуатируется в труднодоступном районе таежной реки Кручины

в Сибири. Оценки показывают, что десятилетняя эксплуатация установки типа «Бета-С» в труднодоступном районе дает экономию в 50 тыс. руб. по сравнению с использованием химических источников тока [1].

За последнее время разработан и изготовлен изотопный генератор «Бета-3» электрической мощностью 10—12 *вт*, предназначенный для работы в районах Крайнего Севера и Антарктиды, где температура достигает — 70° С. Генератор вырабатывает электрический ток напряжением 10 *в*, срок его службы 10 лет. Общий вид генератора показан на рис. 7.11.

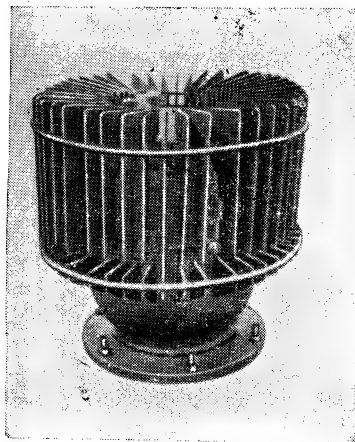


Рис. 7.10. Изотопный термогенератор «Бета-С».

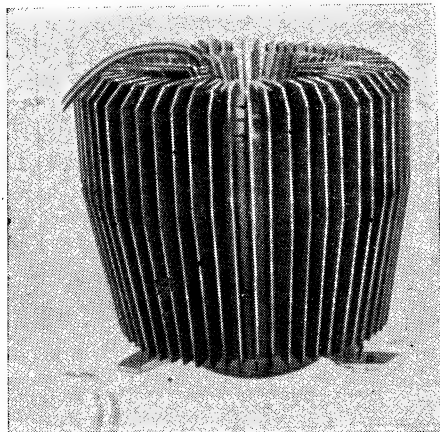


Рис. 7.11. Изотопный термогенератор «Бета-3».

Очень перспективно использование изотопных генераторов в тех случаях, когда требуется электроэнергия для питания электронной аппаратуры, тепло для ее обогрева. В связи с этим Всесоюзным научно-исследовательским институтом радиационной техники разработан модифицированный генератор, который дает 12 *вт* электрической и 250 *вт* тепловой мощности. В качестве топлива в этой установке используется стронций-90 активностью 40 000 *кюри*. Такой генератор, названный «Ангара», установлен в Саянах на высоте 3000 *м* над уровнем моря. Он используется для питания непрерывно работающей станции по исследованию космических лучей и для поддержания заданного температурного режима в кабине станции [1].

В процессе разработки и эксплуатации изотопных термогенераторов типа «Бета» был решен ряд важных технических вопросов;

а) показано, что низкотемпературные термоэлементы на основе тройных сплавов висмута, теллура, сурьмы и селена, имеющие в ин-

тервале 20—270° С к. п. д. 6%, могут работать в течение 30 000 *ч* (по данным испытания «Бета-2»);

б) исследование свойств экранной теплоизоляции с заполнением пространства между экранами инертным газом (аргон, ксенон) позволило увеличить долю тепла, проходящего через преобразователь, до 85—90%;

в) усовершенствование конструкции биологической защиты позволило увеличить выходную мощность генератора в два раза и снизить вес до 120 *кг*.

Результаты испытаний установок типа «Бета» позволили сделать вывод о том, что в генераторах, предназначенных для питания автоматических метеорологических станций, наиболее целесообразно использовать такие β -активные изотопы, как стронций-90 и церий-144. Опыт эксплуатации генераторов типа «Бета» показал перспективность их использования для метеорологических станций, что позволило начать серийный выпуск этих установок. В ближайшее время десятки таких станций с изотопными термоэлектрическими генераторами будут установлены в различных районах нашей страны [1].

Помимо вышеуказанных генераторов на церии-144 и стронции-90 в 1964 г. был разработан и поставлен на опытные испытания изотопный термогенератор подводного назначения на цезии-137, который выработал более 200 *квт · ч* электроэнергии. Закончена также разработка нескольких типов изотопных термогенераторов на основе плутония-238 и кюрия-242 [9]. Например, разработан портативный термогенератор электрической мощностью порядка 1 *вт* [МИГ-67]. В качестве топлива в нем используется плутоний-238; вес генератора 0,5 *кг*, а всей установки — 5 *кг*. Установка МИГ-67 размером с обычный транзисторный приемник предназначена для питания различных лабораторных устройств. Этот генератор можно также использовать как походную электростанцию. Изготовлен изотопный генератор на кюри-242 с к. п. д. 8—10%, в котором используются каскадные термоэлементы, работающие в диапазоне температур 300—850° К.

Генераторы серии СНАП-7. В 1959 г. фирма «Мартин» по контракту с КАЭ приступила к разработкам радиоизотопного генератора мощностью 5 *вт* на стронции-90. Генератор предназначался для питания аппаратуры метеорологической станции. В августе 1961 г. генератор вместе с телеметрической аппаратурой был установлен на необитаемом острове Акселия — Хейнберг, в 1100 *км* от Северного полюса, где успешно проработал в течение двух лет.

Генератор имел тепловой блок цилиндрической конфигурации, вокруг которого размещались термоэлектрические элементы из теллурида свинца. Между преобразователем и стальным корпусом генератора располагалась биологическая свинцовая защита толщиной 11 *см*. В топливную ампулу из хастеллоя-С загружалось 17 500 *кюри* стронция-90 в виде титаната стронция. Коммутация термоэлементов

по горячей стороне осуществлялась стальными пластинками, а по холодной — медными зажимами. Для обеспечения надежного теплового контакта зазор между защитой и преобразователем заполнялся ртутью. Успешное испытание этой установки способствовало разработке программы СНАП-7.

В 1961 г. фирма «Мартин» по заданию ВМФ США начала работы по программе СНАП-7. Генераторы этой серии рассчитаны на более высокую мощность и значительно больший срок службы, чем первый генератор для метеорологической станции. Серия СНАП-7 состояла из пяти генераторов различного назначения. Основные характеристики генераторов приведены в табл. 7.14.

Таблица 7.14

Характеристики генераторов серии СНАП-7 [4]

Характеристика	Номер серии		
	7А и 7С	7В и 7Д	7Е
Электрическая мощность, <i>вт</i>	11,6	68	6,5
Тепловая мощность, <i>вт</i>	256	1440	198
К. п. д., %	4,5	4,7	3,3
Топливо	SrTiO ₄	SrTiO ₄	SrTiO ₄
Активность загружаемого стронция-90, <i>кюри</i>	40 000	225 000	31 000
Материал топливной ампулы	Хастеллой-С	Хастеллой-С	Хастеллой-С
Термоэлектрический материал	PbTe	PbTe	PbTe
Количество термоэлементов, шт.	60	120	60
Температура горячего спая, °С	510	490	410
Температура холодного спая, °С	66	60	17
Теплоизоляция	Мин-К1301	Мин-К1301	Мин-К1301
Материал корпуса генератора	Хастеллой-С	Хастеллой-С	Хастеллой-С
Биологическая защита	Уран	Уран	Литое желе-
			зо
Вес генератора, <i>кг</i>	850	2090	1020
Срок службы, годы	10	10	5

Примечание. Характеристики соответствуют начальному периоду работы установок.

Генераторы СНАП-7А и СНАП-7С имеют одинаковую конструкцию, но различные назначения. Генератор СНАП-7А электрической мощностью 10 *вт* предназначен для питания аппаратуры мигающего светового буя береговой охраны США, а генератор СНАП-7С той же мощности — для метеорологической станции ВМФ США. Конструкция этих установок показана на рис. 7.12. В качестве материала топлива выбран титанат стронция, который загружался в четыре цилиндрические ампулы диаметром 5,1 *см*, изготовленные из хастеллой-С. Герметизация ампул обеспечивалась сваркой. Затем ампулы помещали в тепловой блок квадратного сечения. Плоские боковые грани блока, в котором прижимались термоэлементы, покрывались окисью алюминия, обеспечивающей электроизоляцию. Другие поверхности блока теплоизолировались материалом типа

Мин-К толщиной 3,5 *см*, находящимся в атмосфере аргона. Теплопроводность такой изоляции составляла 0,025 *вт/(м·град)*.

Термоэлектрический преобразователь состоял из 60 пар термоэлектрических элементов, собранных в 12 батарей. Термоэлементы (рис. 7.13) каждой батареи монтировались на одной пластине и заключались

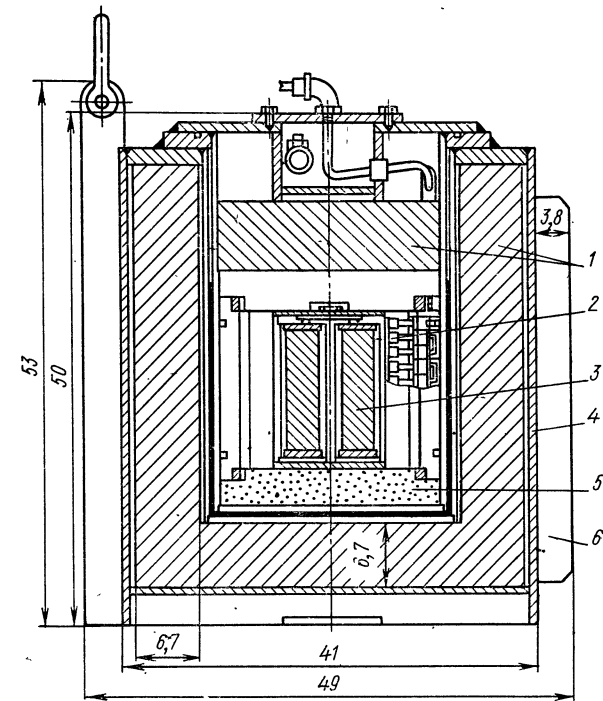


Рис. 7.12. Генератор СНАП-7А (разрез, основные размеры даны в сантиметрах):

1 — защита из обедненного урана; 2 — термоэлементы; 3 — топливо; 4 — корпус генератора; 5 — теплоизоляция; 6 — ребро охлаждения.

в слюдяные гильзы, чтобы предотвратить окисление в случае попадания кислорода воздуха. Коммутация осуществлялась с помощью медных пластин.

В процессе разработки исследовались два термоэлектрических материала: «Мартин» и «Транзитрон». Характеристики их приведены в табл. 7.15.

На основании результатов испытаний были выбраны материал «Мартин» с дырочной проводимостью и материал «Транзитрон» с электронной проводимостью. Последний имеет лучшую прочность по сравнению с аналогичным материалом «Мартин».

Тепловой блок, термоэлектрический преобразователь и другие внутренние узлы заключены в оболочку из хастеллой-С, вставлен-

Таблица 7.15

Характеристики материалов

Характеристика	Дырочная проводимость		Электронная проводимость	
	«Мартин»	«Транзитрон»	«Мартин»	«Транзитрон»
Удельное сопротивление, $\text{мком} \cdot \text{см}$	1310	2970	2675	4300
Коэффициент теплопроводности, $\text{вт}/(\text{см} \cdot \text{град})$	0,0199	0,018	0,020	0,0196
ТЭДС для пары, $\text{мкв}/\text{град}$	210	215	188	190
Добротность, $10^6 (\text{град})^{-1}$	1595	1235	564	538

ную в цилиндрическую полость биологической защиты. Для улучшения теплового контакта между холодными спаями термоэлементов и оболочкой использованы алюминиевые пластины, покрытые электроизоляционным материалом. Тепловой контакт между защитой и оболочкой генератора осуществляется при помощи слоя ртути.

Стронций-90 создает заметное γ -излучение. Расчетное значение мощности дозы, создаваемой тепло-выделяющим блоком без защиты на расстоянии 1 м, равно 500 р/ч сбоку и 235 р/ч сверху и снизу. Для снижения мощности дозы до 10 мр/ч на расстоянии 1 м от источника применен обедненный уран толщиной 6,6 см (общий вес 106 кг). Такая урановая защита, размещенная вокруг термоэлектрического генератора, обеспечила наименьшие размеры и вес генератора. При этом мощность дозы составила 7—9 мр/ч на расстоянии 1 м от поверхности генератора, что позволило транспортировать его в общих товарных вагонах.

Для повышения отвода тепла в окружающую среду внешний корпус генератора снабжен 36 реб-

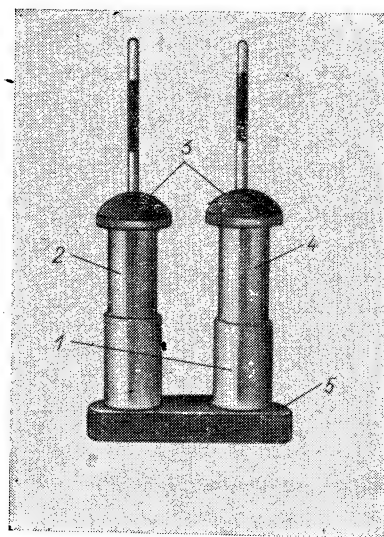


Рис. 7.13. Термоэлемент генератора СНАП-7А:

1 — гильза из слюды; 2 — п-ветвь; 3 — холодные спай; 4 — р-ветвь; 5 — горячий спай.

рами высотой 3,8 см. В установке СНАП-7А тепло, прошедшее термоэлементы и внешний корпус генератора, сбрасывается в морскую воду, а в установке СНАП-7С это тепло используется для поддержания температуры в корпусе генератора не ниже $+4,4^\circ\text{C}$, когда внешняя температура ниже нуля.

Перед эксплуатацией генератора внутреннюю оболочку промывают и заполняют инертным газом под давлением 1 атм. В процессе эксплуатации оболочку можно заполнять газом с более низкой теплопроводностью, обеспечивая таким образом ступенчатое регулирование мощности. Например, в случае заполнения оболочки аргоном в конце срока службы электрическая мощность генератора падает до 9,3 вт . Если же аргон заменить криптоном, имеющим более низкую теплопроводность, то можно поднять выходную мощность до 9,85 вт .

Генератор СНАП-7А был установлен на морском буе в декабре 1961 г., а спустя шесть месяцев выходная мощность генератора стала падать. Проверка показала, что внутреннее давление газа возросло на 0,5 атм. Это привело к резкому увеличению паразитной утечки тепла.

Как показал анализ, увеличение давления обусловлено в основном накоплением водорода и гелия, выделившихся из органического материала-связки тепловой изоляции Мин-К в результате нагрева и радиационных эффектов. Генератор был продут и вновь заполнен инертным газом, для снижения газовой выделенности в оболочку генератора поместили металлические газопоглотители.

Генератор СНАП-7С был загружен топливом и после проверочных испытаний в феврале 1961 г. перевезен в Антарктиду и установлен на метеорологической станции, расположенной на расстоянии 1100 км от Южного полюса.

Генераторы СНАП-7В и СНАП-7Д аналогичны по конструкции, но использовались для различных целей. Установка СНАП-7В мощностью 60 вт предназначена для питания навигационного маяка береговой охраны США, а установка СНАП-7Д той же мощности — для плавучей метеорологической станции ВМФ США, расположенной на барже. Конструкция генератора СНАП-7В показана на рис. 7.14, основные характеристики приведены в табл. 7.14.

В связи с большой мощностью эти генераторы конструктивно отличаются от установки СНАП-7А. Для размещения большего количества термоэлементов тепловой блок имеет шестигранную форму. В этот блок, изготовленный из хастеллоя-С, загружаются не четыре, а семь ампул с титанатом стронция (225 000 кюри). Термоэлементы электрически изолированы от поверхности теплового блока с помощью тонких слюдяных пластин, которые хорошо проводят тепло и имеют низкий коэффициент трения, позволяя термоэлементам свободно перемещаться при тепловых расширениях.

Тепловой блок, преобразователь и другие внутренние конструкции заключаются в оболочку из хастеллоя-С. Тепловой контакт между оболочкой и биологической защитой обеспечивается термическим расширением оболочки и ликвидацией зазора между этими элементами конструкции. Снижение мощности дозы до требуемого уровня (10 мр/ч на расстоянии 1 м от генератора) обеспечивается защитой из обедненного урана толщиной 8,25 см. Для охлаждения генератора используется специальная система с теплоносителем.

Все генераторы серии СНАП-7 подвергались прочностным испытаниям при следующих нагрузках: удары по 3 *g* с полушириной импульса 6 *мсек* во всех трех плоскостях, вибрации в трех плоскостях с частотой 5—300—5 *гц* в течение 15 *мин* при перегрузках ± 3 *g*. Конструкции генераторов выдержали эти испытания.

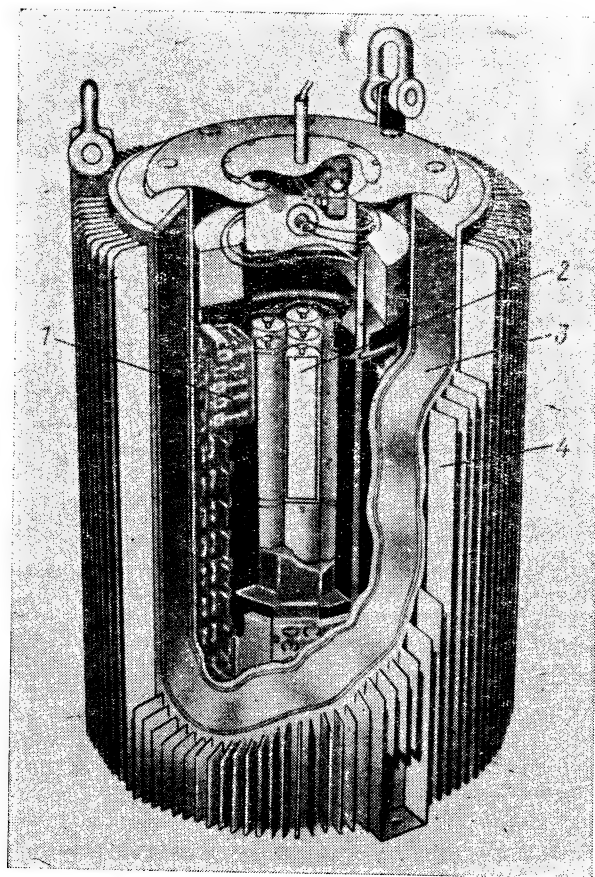


Рис. 7.14. Разрез генератора СНАП-7В:
1 — термоэлементы; 2 — топливо; 3 — защита; 4 — ребра охлаждения.

Генераторы для подводного использования. Разработка термогенераторов подводного назначения была начата вскоре после испытаний наземных генераторов серии СНАП-7. Первой такой установкой был изотопный генератор СНАП-7Е мощностью 6,5 *вт*, загруженный топливом из титаната стронция активностью 31 000 *кюри*. Генератор предназначался для питания аппаратуры глубоко-

водного акустического маяка, установленного в океане на глубине до 6850 *м*. Маяк можно использовать для навигации надводных и подводных кораблей, а также для проведения подводных акустических экспериментов. Конструкция генератора СНАП-7Е аналогична генератору СНАП-7А, за исключением биологической защиты, в которой уран заменен литым железом.

Перед загрузкой топлива помимо обычных испытаний по программе СНАП-7 генератор дополнительно испытывался на давление до 680 *атм*, соответствующее гидростатическому давлению при эксплуатации. В 1962 г. установка была доставлена на Бермудские острова и опущена в Атлантический океан. Когда была достигнута глубина 3820 *м*, система прекратила работу и была поднята обратно. Оказалось, что во внешней оболочке образовалась течь. Генератор был исправлен и через некоторое время вновь опущен в океан, где он эксплуатировался до июня 1966 г.

Интересно отметить, что в США начиная с 1960 г. проводились разработки проектов подводных генераторов, в которых в качестве топлива предполагалось использовать не чистый изотоп, как во всех других установках, а смесь продуктов деления. Применение в качестве топлива смеси продуктов деления без обработки или с частичной обработкой позволяет резко снизить стоимость этих установок и расширить тем самым области их применения. Если бы удалось связать церий-144, стронций-90 и цезий-137 (общий выход в процессе деления около 20%) в химически устойчивое соединение, можно было бы получить эффективное изотопное топливо и значительно облегчить проблему использования сбросных отходов атомной промышленности. По оценкам фирмы «Дженерал инструмент» можно получить смесь продуктов деления, содержащую в основном цезий-137 и стронций-90, с удельной мощностью около 0,1 *вт/см³* [4]. Такое топливо может быть использовано, например, для подводных установок, где обеспечивается надежный теплоотвод в окружающую среду при сравнительно низких температурах. Этой же фирмой разработано несколько конструктивных схем подводных генераторов с топливом из смеси продуктов деления. Одна из таких конструкций представлена на рис. 7.15.

Поскольку топливо из смеси продуктов деления с низкой удельной мощностью может обеспечить температуру порядка 250—300° С, для передачи тепла от источника к термоэлектрическому преобразователю целесообразно использовать циркулирующий теплоноситель. В этом проекте теплоноситель не был выбран, но пригодным для этой цели могут оказаться жидкие металлы или некоторые органические жидкости. Такая система теплопередачи упрощает регулирование мощности, позволяет разместить термоэлементы вдали от источника излучений, гибкая конструкция трубопроводов может быть использована для смягчения ударных и вибрационных нагрузок. Как видно из рис. 7.15, теплоноситель нагревается в спиральном нагревателе, расположенном в тепловом блоке, и переносит тепло к горячим спаям термоэлементов. Отработанное тепло

($T_x \approx 7 \div 10^\circ \text{C}$) от холодных спаев передается через статическую теплопроводящую жидкость внешней оболочке и затем окружающей морской воде.

В качестве термоэлектрического материала в указанном диапазоне температур может быть использован теллурид висмута. Топливный блок, загруженный смесью продуктов деления, будет иметь значительно большие размеры, чем, например, блок генератора СНАП-7. Поэтому защита такой установки тяжелее, но ее стоимость может оказаться в несколько раз меньше стоимости установок серии СНАП-7. Из-за технических трудностей, обусловленных в основном разработкой топливного материала, в 1963 г. исследования генераторов на смеси продуктов деления были прекращены.

Изотопные термоэлектрические генераторы второго поколения для наземных и подводных установок, разрабатываемые по программам СНАП-21 и СНАП-23, являются дальнейшим развитием генераторов серии СНАП-7.

Программа СНАП-21 предусматривает разработку серии изотопных генераторов мощностью 10 *вт* с к. п. д. 6—8% и сроком службы более четырех лет. Генераторы рассчитаны на эксплуатацию в

море при гидростатическом давлении до 70 *атм.* Они весят 226 *кг*, имеют высоту 68 *см*, диаметр 38 *см* (ожидаемая стоимость от 12 до 14 тыс. долл., включая топливо). Предполагают, что мощность следующих установок будет от 20 до 60 *вт*.

В соответствии с программой СНАП-23 разрабатывается другая серия изотопных генераторов мощностью от 20 до 200 *вт* для использования как в наземных, так и в надводных установках. Генераторы будут иметь высоту и диаметр 63,5 *см*, срок службы без ремонта не менее пяти лет. Предполагаемая стоимость — 33 тыс. долл. Стоимость топлива составит примерно половину этой суммы [3].

Указанные установки будут иметь усовершенствованные термоэлементы. При эксплуатации генераторов типа СНАП-7 обнаружены следующие недостатки: падение мощности и снижение напряжения в процессе работы из-за окисления контактов на горячих спаях термоэлементов из теллурида свинца, увеличение контактного сопротивления и сублимация сплава. В связи с этим в генераторах второго поколения СНАП-21 и СНАП-23, разрабатываемых фирмами «Мартин» и «ЗМ», применена новая конструкция термоэлектрических батарей (модулей). В новой конструкции группа термоэлементов заключена в герметичный корпус из нержавеющей стали, заполняемый гелием или аргоном. Термоэлементы изолированы от корпуса тонким слоем окиси алюминия. Газ предохраняет элементы от воздействия кислорода. Компонировка термоэлементов в отдельные модули обеспечивает прочность, удобство монтажа и возможность замены модулей при ремонте генератора.

По заданию ВМФ США фирма «Вестингауз электрик» [14] разработала глубоководный генератор мощностью 5 *вт* на стронции-90 для гидролокации, питания навигационного оборудования и других целей. Вес генератора 1360 *кг*, высота 65 *см*, диаметр 73 *см*, глубина погружения 6000 *м*, срок службы 5 лет. Его особенность — использование термоэлектрического преобразователя трубчатого типа, устройство которого показано на рис. 7.16.

Помимо указанных программ КАЭ выдала задания на разработку мощных (до 100 *квт*) изотопных термогенераторов на кобальте-60, стронции-90 и цезии-144 для питания антарктических станций, подводных установок, а также для удовлетворения нужд Армии и ВМФ [15].

Интересно отметить, что наряду с изотопными термоэлектрическими источниками тока начались разработки изотопных генераторов, работающих на основе паротурбинного цикла. Например, фирма «Аэроджей Джeneral Нуклеоникс» по контракту с КАЭ разработала проект глубоководной установки мощностью 3 *квт* [16]. В качестве топлива использован кобальт-60 (1,56 *Мкюри*), рабочим телом служит даутерм-А. В первом контуре циркулирует даутерм, во втором — вода. Установка рассчитана на давление 156 *кг/см*²

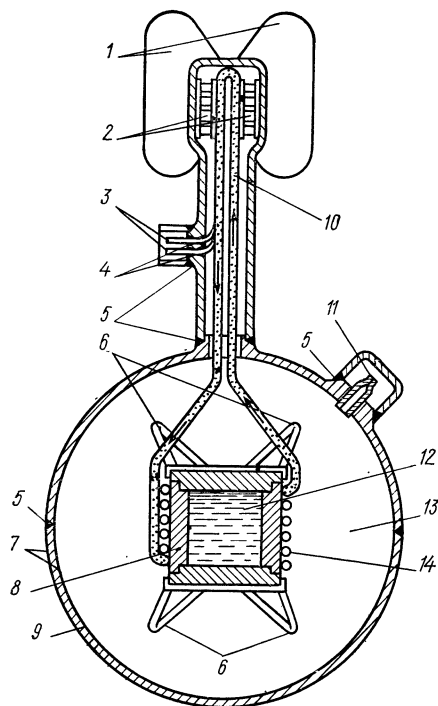


Рис. 7.15. Генератор с топливом из смеси продуктов деления:

1 — ребра охлаждения; 2 — термопреобразователь; 3 — клеммы; 4 — изоляция; 5 — сварные швы; 6 — опорная стойка; 7 — оболочки; 8 — топливный блок; 9 — теплоизоляция; 10 — теплообменник; 11 — труба для вакуумирования; 12 — топливо; 13 — вакуумная изоляция; 14 — трубы для теплоносителя.

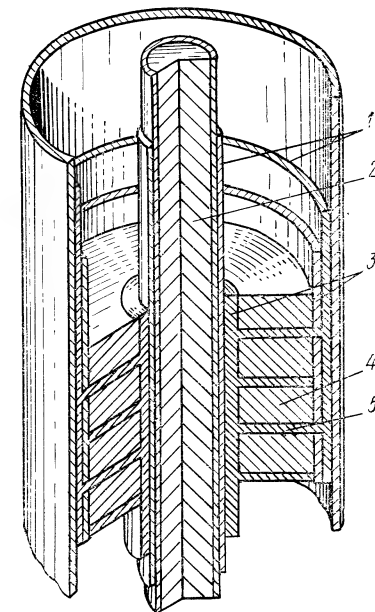


Рис. 7.16. Термоэлектрическая батарея глубоководного термогенератора:

1 — электроизоляция с высокой теплопроводностью; 2 — изотопное топливо; 3 — электропроводник; 4 — термоэлементы; 5 — электроизоляция с низкой теплопроводностью.

и срок службы 10 000 ч. Удельная стоимость ее составляет 18—33 долл/вт (г).

Генераторы серии RIPPLE*. В 1965 г. под руководством Управления по атомной энергии Великобритании в атомном центре Харуэлл разработан и изготовлен прототип изотопного термогенератора электрической мощностью 0,075 вт на стронции-90. Вскоре было создано еще несколько генераторов этого типа, предназначенных главным образом для питания морских навигационных установок. Характеристики этих генераторов приведены в табл. 7.16.

Таблица 7.16
Характеристики генераторов серии RIPPLE [17]

Характеристика	I	II	III	IV	V, VI, VII
Электрическая мощность, вт	0,075	0,75	0,75	2,5	1
Тепловая мощность, вт	4,4	4,4	29	2,5	1
К. п. д., %	1,7	1,7	2,6	2,5	1
Топливо	SrTiO ₃	SrTiO ₃	SrTiO ₃	SrTiO ₃	SrTiO ₃
Изотоп	Sr ⁹⁰	Sr ⁹⁰	Sr ⁹⁰	Sr ⁹⁰	Sr ⁹⁰
Активность, кюри	700	700	4600	—	—
Термоэлектрический материал	Bi ₂ Te ₃	Bi ₂ Te ₃	Bi ₂ Te ₃	Bi ₂ Te ₃	Bi ₂ Te ₃
Температура горячего спая, °C	180	180	—	—	—
Температура холодного спая, °C	40	40	—	—	—
Материал защиты	Свинец	Сплав вольфрама	Сплав вольфрама	Сплав вольфрама	Обедненный уран
Вес генератора, кг	600	230	275	—	—
Срок службы, годы	10	10	—	—	5
Год пуска	1965	1965	1966	—	1967
Назначение	Демонстрационная установка	Демонстрационная установка	Экспериментальный образец	Подводная связь	Навигационная установка

Первые две установки RIPPLE-I и RIPPLE-II (рис. 7.17) аналогичны по конструкции и отличаются только материалом защиты. Генератор RIPPLE-I имеет свинцовую защиту и предназначен для использования в тех случаях, когда вес и габаритные размеры не играют существенной роли. В генераторе RIPPLE-II использована более легкая защита из вольфрамового сплава. Загрузка стронция-90 активностью 700 кюри позволяет получать тепловую мощность 4,4 вт. Коэффициент полезного действия генератора довольно низкий (1,7%). Это объясняется относительно низкой (180° C) температурой поверхности теплового блока и горячих спаев термоэлементов.

* RIPPLE — Radio Isotope Powered Pulsed Light Equipment.

В качестве термоэлектрического материала использован теллурид висмута. Преобразователь состоит из двух параллельных цепей, содержащих по 18 термоэлементов, соединенных последовательно. Термостолбики имеют длину 10 мм и сечение 1,5 × 1,5 мм. ТЭДС одной пары 0,022 в. Ожидаемая стоимость электроэнергии 0,01—0,02 фунта стерлингов (вт·ч). В комплекте с термогенератором имеется преобразователь, позволяющий получать постоянный ток 30 мвт напряжением до 6 в.

Опытная эксплуатация первого экспериментального генератора показала некоторое ухудшение электрических характеристик с течением времени, второй генератор работал более устойчиво.

На основе опыта эксплуатации первых демонстрационных генераторов создано еще несколько установок мощностью 1 вт со сроком службы около 5 лет и начата разработка генераторов мощностью от 8 до 40 вт. В 1967 г. генераторы RIPPLE-V, VI и VII были установлены в море и успешно проработали от 8 до 14 месяцев [17].

Помимо Великобритании разработка наземных изотопных генераторов ведется во Франции, ФРГ и Евратоме. В последнее время исследовательским центром Евратома в Испре (Италия) начата разработка термогенератора мощностью 5 вт на основе тулия-170. Разрабатываются также генераторы мощностью от нескольких микроватт до милливатт для медицины, автоматизации и других целей.

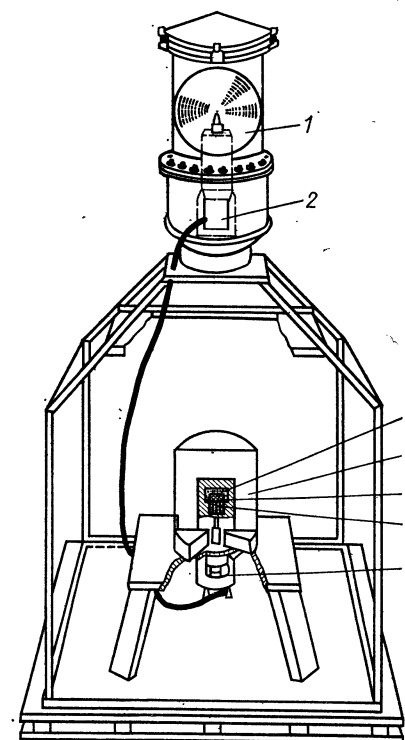


Рис. 7.17. Термогенератор RIPPLE:
1 — лампа-вспышка; 2 — преобразователь тока; 3 — теплоизоляция; 4 — биологическая защита; 5 — изотопное топливо; 6 — термоэлементы; 7 — генератор.

§ 7.5

Изотопные термогенераторы для космоса

Введение. Работы по подготовке к космическим полетам, начатые в Советском Союзе в тридцатых годах, были блестяще завершены выводом на орбиту 4 октября 1957 г. первого искусственного спутника Земли, ознаменовавшим начало космической эры

человечества. Первый спутник просуществовал как космическое тело в течение 92 суток, 4 января 1958 г. спутник вошел в плотные слои атмосферы и прекратил свое существование. С помощью первого искусственного спутника Земли была получена информация о плотности атмосферы, электронной концентрации в ионосфере, метеоритной опасности и другие сведения [18].

Через месяц, 3 ноября 1957 г., был выведен на орбиту второй, а в мае 1958 года третий искусственные спутники Земли, которые продолжили программу исследований, начатую с запуском первого спутника.

12 апреля 1961 г. в Советском Союзе был совершен первый полет человека в космическое пространство. На орбиту вокруг Земли был выведен корабль-спутник «Восток», пилотируемый летчиком-космонавтом Ю. А. Гагариным.

За период, прошедший со дня запуска первого искусственного спутника Земли, космические аппараты проникли глубоко в космос, достигли Луны и Венеры, пролетели вблизи Марса. На орбиты вокруг Земли были выведены сотни спутников для исследования околоземного космического пространства, изучения дальней радио- и телевизионной связи, получения метеорологических данных, улучшения навигации и других целей.

На первых искусственных спутниках Земли, программа исследований которых была рассчитана на несколько дней или недель, в качестве источников электропитания бортовой аппаратуры использовались химические батареи. Однако химические источники энергии, имеющие сравнительно короткий срок службы (недели,) не могли удовлетворить потребности длительных космических полетов. Поэтому была начата разработка новых источников энергии, обладающих малым весом, высокой надежностью и большим ресурсом работы в условиях космического пространства. Эти исследования развивались главным образом в направлении создания солнечных элементов и радиоизотопных термоэлектрических генераторов. Разработка солнечных источников энергии проводилась в гораздо более широких масштабах и первые образцы солнечных батарей были испытаны на третьем искусственном спутнике Земли [18].

Радиоизотопные генераторы создавались в качестве запасного варианта в основном для решения таких задач по исследованию и использованию космического пространства, для которых солнечные батареи малоэффективны, например, для систем, длительное время работающих на поверхности или в тени планет и Луны, искусственных спутников на орбите, проходящей через мощные радиационные пояса, и др.

Программой разработки первых изотопных генераторов предусматривалось создание демонстрационной энергетической установки с радиоизотопным источником тепла и термоэлектрическим способом преобразования этого тепла в электрическую энергию. В результате оценки свойств радиоактивных изотопов и последующего их

отбора было установлено, что для генераторов космического назначения наиболее подходящим топливом являются α -излучатели.

Исследования термоэлектрического способа преобразования к этому времени также достигли высокого уровня. В СССР в больших количествах работали термоэлектрические генераторы типа ТКК-3 на жидком топливе, массовый выпуск которых был начат в 1953 г. (см. гл. 6). Успешно разрабатывались новые, более эффективные полупроводниковые термоэлектрические материалы, такие, как кремний-германиевый сплав, сплавы на основе висмута, теллура, олова и др. Все эти обстоятельства позволили начать разработку изотопных термогенераторов космического назначения.

Изотопные термоэлектрические генераторы на полонии-210. В рамках программы разработки первых космических изотопных генераторов в СССР было изготовлено несколько установок электрической мощностью до 10 *вт*, отличающихся конструкцией корпуса и способом прижатия термоэлементов к поверхности теплового блока. Один из этих генераторов был загружен полонием-210 активностью 7700 *кюри* и испытан на ресурс в течение 2000 *ч*. Другие установки прошли испытания с электронагревом, в которых были определены тепловые и электрические характеристики, надежность работы термоэлектрического преобразователя и генератора в целом.

В результате рассмотрения различных вариантов была выбрана конструкция генератора, в которой тепловой блок в форме плоского параллелепипеда зажат с двух сторон термоэлектрическими элементами (рис. 7.18). Холодные спаи термоэлементов соединялись с корпусом генератора. Тепло, генерируемое изотопным источником, проходило через термоэлектрический преобразователь, затем передавалось корпусу генератора за счет теплопроводности и отводилось в окружающее пространство излучением [13].

В табл. 7.17 приведены основные результаты, полученные при испытании трех установок с электронагревом. В качестве подогревателя использовалась молибденовая спираль, помещенная в графитовый блок тех же размеров, что и тепловой блок. Испытания проводились в течение более 1000 *ч* при различных тепловых режимах.

Тепловой блок был выбран в форме плоского параллелепипеда шириной и длиной по 60 *мм* и высотой 13 *мм*. Блок такой формы прост в изготовлении и обеспечивает высокий коэффициент использования тепла (см. табл. 7.17). Тепловой блок изготавливался из нержавеющей стали и имел пять глухих каналов для размещения ампул с радиоактивным изотопом. Заключенный в никелевую ампулу полоний-210 помещали в две оболочки из нержавеющей стали. Оболочки герметизировались сваркой. Такие меры предосторожности обусловлены тем обстоятельством, что по расчетным данным давление гелия на стенки ампулы к концу срока испытаний достигнет 200 *атм* при рабочей температуре 650—700° С. Заключенную в оболочки ампулу помещали в глухой канал теплового блока, который можно закрыть пробкой на резьбе. Герметизация обеспечивалась

Таблица 7.17

Характеристики изотопных термоэлектрических генераторов [13]

Характеристики	Номер образца генератора		
	5	6	7
Электрическая мощность, <i>вт</i>	10,15	10,9	9,65
Тепловая мощность, <i>вт</i>	320	320	320
Общий к. п. д., %	3,18	3,41	3,02
К. п. д. преобразователя, %	3,75	4,0	3,56
Тепло, проходящее через преобразователь, %	85	85	85
Э. д. с., <i>в</i>	3,9	3,6	3,8
Температура горячего спая, °C	861	840	817
Температура холодного спая, °C	241	250	240
Температура корпуса-излучателя, °C	190	196	195
Вес генератора (без теплового блока), <i>кг</i>	3,1	2,7	2,8
Размеры, <i>мм</i> :			
высота	128	126	210
диаметр	195	196	190
Площадь поверхности излучателя, <i>см²</i>	—	—	900

обваркой головки пробки. Тепловую мощность изотопного источника в сборе определяли калориметрическим путем. На рис. 7.19 показан тепловой блок и основные его элементы.

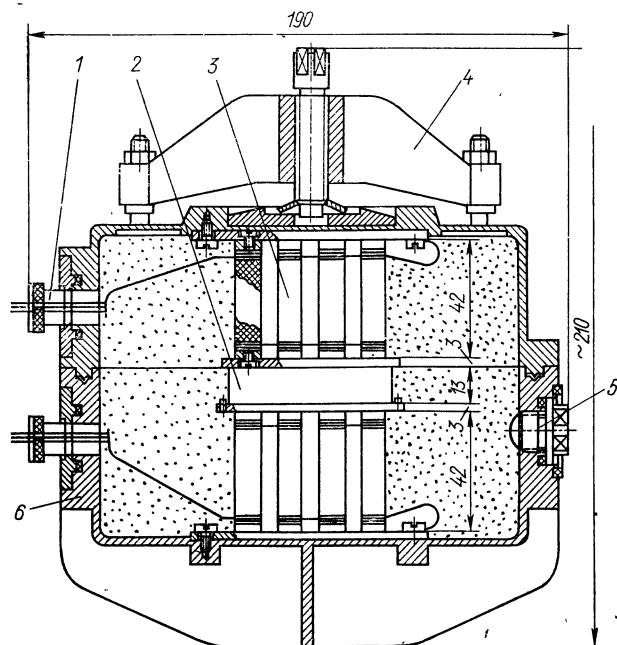


Рис. 7.18. Изотопный генератор на полонии-210 (разрез):
1 — токопровод; 2 — ампула с топливом; 3 — термоэлементы;
4 — стру бцина; 5 — пробка; 6 — корпус-излучатель.

Термоэлектрический преобразователь состоял из двух батарей по 16 термостолбиков в каждой. Термоэлементы крепились винтами к двум металлическим пластинам: с горячей стороны — к пластине из углеродистой стали, с холодной — к медной пластине. В качестве термоэлектрического материала был выбран кремний-германиевый сплав, имеющий в интервале температур 300—800° C средний коэффициент добротности $z = 4 \cdot 10^{-4} \text{ (град)}^{-1}$ и теплопроводность

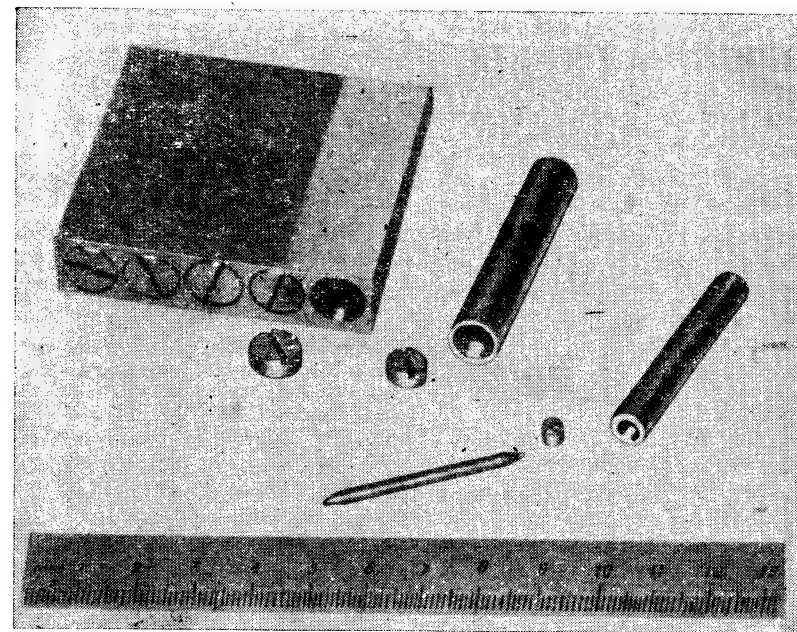


Рис. 7.19. Тепловой блок и его детали.

6,3 *вт/(м·град)*. Кремний-германиевый сплав, характеристики которого приведены в гл. 4, имеет высокую рабочую температуру, малый удельный вес и хорошие прочностные свойства. Термостолбики квадратного сечения площадью 0,8 *см²* имели длину 3 *см*. Выбор длины термоэлемента определялся двумя факторами: уменьшение длины термоэлемента приводит к росту доли сопротивления коммутации в общем сопротивлении термоэлектрического преобразователя; при увеличении длины элемента увеличиваются габаритные размеры и вес установки. Для коммутации термоэлементов использовались молибденовые пластины, приваренные к никелевой фольге толщиной 0,02 *мм*. Соединение термоэлектрических батарей в генераторе 5 проведено с помощью медной проволоки в керамической изоляции, а в генераторах 6 и 7 для этой цели использован металлический корпус.

Корпус генератора изготовлен из дюралюминия и разделен на две части для обеспечения необходимого теплового контакта термоэлементов с корпусом и тепловым блоком. Прижим термоэлементов к тепловому блоку в генераторе 6 обеспечивался тарельчатыми стальными пружинами, надеваемыми на болты, стягивающие обе части корпуса. В генераторе 7 необходимый тепловой контакт достигался сжатием обеих частей корпуса струбиной, закрепленной на фланцах. Нижняя часть корпуса имеет ребра жесткости, а верхняя — допускает прогиб на 2 мм. Герметичность соединения обеих частей корпуса обеспечивается использованием уплотнения из термостойкой резины. Корпус имеет отверстие для заполнения внутреннего объема термоизоляцией и откачки воздуха. Внешняя поверхность корпуса покрыта тонким слоем термостойкой краски с коэффициентом излучения $\epsilon = 0,85$.

Испытания генератора с загрузкой полония-210. Для загрузки радиоактивным изотопом был выбран генератор 7. Тепловая мощность изотопного источника в начале работы генератора составляла 244 *вт*, а в конце снизилась до 163 *вт*. Изменение основных параметров генератора во время испытаний приведено в табл. 7.18. В соответствии с программой испытаний непрерывно контролировались следующие характеристики: напряжение на нагрузке 0,34 *ом*, температура горячих спаев термоэлементов (две точки), температура корпуса генератора, уровень γ -излучения на расстоянии 0,3 м от генератора. Вольт-амперные характеристики измерялись с периодом 5—7 суток. По окончании испытаний генератор был демонтирован.

Таблица 7.18

Результаты испытаний генератора на полонии-210 [13]

Характеристика	Время испытаний, ч			
	48	1 000	1 400	2 000
Электрическая мощность, <i>вт</i>	5,8	3,79	3,24	2,52
Тепловая мощность, <i>вт</i>	244	200	185	163
К. п. д. генератора, %	2,36	1,91	1,75	1,55
Активность полония-210, <i>кюри</i>	7700	6300	5320	5140
Напряжение на нагрузке 0,34 <i>ом</i> , <i>в</i>	1,4	1,14	1,04	0,92
Э. д. с., <i>в</i>	2,85	2,3	2,09	1,88
Температура горячих спаев, °С	759	633	600	545
Температура корпуса-излучателя, °С	230	202	192	163

Результаты испытаний генератора на полонии-210 подтвердили правильность теоретических расчетов и показали высокую надежность и безопасность изотопных термоэлектрических генераторов. Хотя разработка первых изотопных термогенераторов носила демонстрационный характер, заложенные в них принципы были исполь-

зованы во всех последующих установках этого типа. Доклад о первых космических изотопных источниках тока был представлен на III Международную конференцию по мирному использованию атомной энергии в Женеве в 1964 г.

В сентябре 1965 г. произведен запуск ракеты-носителя, которая вывела на орбиту пять искусственных спутников Земли: «Космос-80», «Космос-81», «Космос-82», «Космос-83», «Космос-84». На одном из этих спутников в качестве источника питания бортовой аппаратуры был установлен изотопный термоэлектрический генератор. Вскоре после этого был запущен в космическое пространство другой, более мощный изотопный термогенератор на искусственном спутнике Земли типа «Космос». Оба генератора успешно завершили намеченную программу испытаний, при этом были приняты меры, полностью исключающие возможность распространения радиоактивного изотопа в атмосфере и на поверхности Земли [19].

Генератор СНАП-1А. В начале пятидесятых годов Маундской лабораторией по контракту с КАЭ США начали исследования термоэлектрического способа преобразования энергии радиоактивного распада в электрическую энергию. На основе результатов этих исследований в 1954 г. создана лабораторная модель изотопного термогенератора электрической мощностью 1,8 *вт*. Тепло, генерируемое полонием-210 (активность 146 *кюри*), преобразовывалось в электроэнергию с помощью хромель-константановых термопар. Семь таких термопар прикреплялись горячими спаями к поверхности теплового блока сферической формы, а холодные спаи соединялись с внешней охлаждаемой оболочкой. Маундской лабораторией разработано еще несколько моделей генераторов аналогичной конструкции, но большей мощности.

Результаты разработок послужили основой для развития изотопной термоэлектрической энергетики в США. Основные принципы, заложенные в конструкцию генераторов Маундской лаборатории, были воплощены почти во всех последующих изотопных термогенераторах.

В конце пятидесятых годов к разработке указанных установок были подключены фирмы «Мартин», «Вестингауз», «Дженерал электрик» и др. Однако позднее основные работы сосредоточились в лабораториях фирмы «Мартин».

В 1957 г. фирма «Мартин» по заданию КАЭ приступила к изучению возможностей создания и использования изотопных генераторов для космических аппаратов военного применения. Несколько позже были определены основные требования к установке и принцип ее действия. Установка получила название СНАП-1. В начале разработки мощность установки была выбрана 500 *вт*, а срок службы — 60 суток. Для такого высокого уровня мощности был выбран турбомашинный способ преобразования энергии. В качестве источника тепла предполагалось использовать церий-144 (начальная загрузка 3 500 000 *кюри*). Ртутный пар, поступающий из парогенератора, обогреваемого радиоизотопным источником, приводил в

движение миниатюрную турбину, затем он конденсировался в излучателе-холодильнике и перекачивался насосом обратно в парогенератор, завершая типичный цикл Ренкина.

В ходе разработки было изготовлено и испытано большинство узлов установки. Однако отсутствие необходимого количества радиоактивных изотопов в пятидесятых годах и недостаточная надежность миниатюрного турбогенератора привели, начиная с 1961 г., к разработке генератора СНАП-1А с термоэлектрическим способом преобразования. Завершение работ по установке СНАП-1 было перенесено в программу СНАП-2, предусматривающую разработку реакторной энергетической установки с циклом Ренкина на ртути.

Переходу от турбомашинного преобразования энергии к прямому способствовало появление новых высокоэффективных полупроводниковых материалов.

Уровень мощности генератора СНАП-1А был снижен с 500 до 125 *вт*, а срок службы увеличен с 60 суток до одного года. Назначение генератора СНАП-1А (так же, как и СНАП-1) — обеспечение электроэнергией разрабатываемых в то время военных космических аппаратов.

Высокая выходная мощность генератора СНАП-1А привела к радикальному изменению конструктивной схемы радиоизотопного генератора, предложенной ранее Маундской лабораторией. Основное отличие состояло в том, что тепло от изотопного источника передавалось термоэлектрическому преобразователю путем излучения, а не механизма теплопроводности, используемого в «классических» изотопных термогенераторах (например, СНАП-3, СНАП-9). Такое решение вызвано тем, что допустимые тепловые потоки на горячих спаях термоэлементов были значительно ниже теплового потока, проходящего через поверхность теплового блока. Снижение температуры горячего спая до допустимого уровня было достигнуто созданием вакуумного пространства между источником тепла и преобразователем.

В процессе наземного обслуживания в это пространство оказалось возможным ввести охлаждающие спирали и сливаемую перед запуском ракеты биологическую защиту из ртути общим весом 1800 *кг*.

В качестве топлива был выбран церий-144, поскольку в то время он был единственным изотопом, который можно было получить в количествах, удовлетворяющих потребности установки СНАП-1А. Начальная загрузка изотопа составляла 880 000 *кюри*, что соответствовало тепловой мощности источника 6500 *вт*. К концу срока службы тепловая мощность генератора снижалась до 2500 *вт*. Сравнительно малый период полураспада церия-144 (284,5 суток) делает необходимым сбрасывание более 4000 *вт* тепловой мощности в начальный период работы генератора. Регулирование мощности осуществлялось при помощи дополнительного излучателя со шторками (см. рис. 7.6), расположенного в нижней части генератора.

Генератор СНАП-1А состоял из внешней оболочки, в которой размещены термоэлементы, и теплового блока, поддерживаемого стойками внутри оболочки (рис. 7.20). Форма оболочки цилиндрическая с двумя полусферическими крышками. Оболочка двухслойная: внутренний слой толщиной 0,16 *см* изготовлен из нержавеющей стали и используется для крепления горячих спаев термоэле-

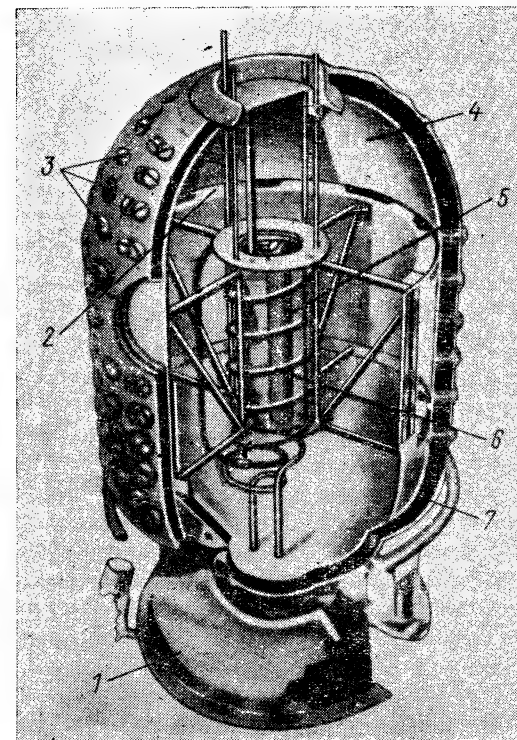


Рис. 7.20. Генератор СНАП-1А:

1 — опорная конструкция; 2 — тепловые экраны; 3 — прижимные устройства термоэлементов; 4 — объем, заполняемый ртутью; 5 — ампула с топливом; 6 — охлаждающий змеевик; 7 — изоляция.

ментов, а внешний слой изготовлен из алюминия толщиной 0,13 *см* и служит излучателем генератора. Пространство между слоями заполнено изоляционным материалом типа Мин-К 1301.

Тепловой блок установки СНАП-1А в форме цилиндра изготовлен из сплава инконель-Х, длина его 28 *см*, диаметр 9,5 *см*. Вдоль оси блока просверлено семь отверстий диаметром 2,5 *см*, в которые вставлены тонкостенные трубки из нержавеющей стали, заполненные окисью церия в виде зерен. Отверстия сверху и снизу закрываются пробками толщиной 1,27 *см*.

Основные характеристики генератора:

Электрическая мощность, <i>вт</i>	125
Тепловая мощность при загрузке, <i>вт</i> . . .	6500
Тепловая мощность в конце срока службы, <i>вт</i>	2600
Тепловая мощность, подаваемая на преобразователь (средняя), <i>вт</i>	2660
К. п. д., %	4,7
Напряжение, <i>в</i>	28
Ток, <i>а</i>	4,4
Полезная нагрузка, <i>ом</i>	6,28
Топливо	Оксид церия
Активность церия-114, <i>кюри</i>	880 000
Размеры ТЭГ, <i>см</i> :	
высота	86,4
диаметр	61,5
Вес (без защиты), <i>кг</i>	86,2
Вес биологической защиты из ртути, <i>кг</i>	1800
Площадь излучателя тепла, <i>м²</i>	1,36
Толщина слоя теплоизоляции Мин-К, <i>см</i>	3,8
Срок службы, <i>годы</i>	1

Высокая удельная мощность, хорошая совместимость с материалом ампулы и полное сгорание при входе в атмосферу в течение 165 сек — основные требования, предъявляемые к топливу генератора СНАП-1А. Из различных исследованных соединений церия окончательный выбор пал на оксид церия, имеющую температуру плавления 2680° С и плотность 6,6 г/см³. Однако высокая температура плавления окиси церия препятствует быстрому сгоранию топлива при входе в атмосферу. Поэтому изучались пути снижения температуры плавления путем добавок железа, карбидов, тантала, титана, кремния и нитридов кремния. В испытаниях лучшие результаты показали образцы с добавкой 7,5—10% карбида кремния.

Значительный объем исследований выполнен по выбору материала теплового блока.

Как видно из результатов, приведенных в табл. 7.19, наиболее подходящие материалы для теплового блока — инконель-Х и сплав

Таблица 7.19

Характеристики материалов для теплового блока			
Материал	Скорость коррозии, <i>мг/(дм²·сутки)</i>		
	в воздухе при 930° С в первые 6 ч	в морской воде при перепаде температуры 43° С в первые 30—40 суток	при контакте с оксидом церия при 930° С в первые 72—96 ч
Хастеллой-В	2821	4,4	107
Инконель-Х	255	0,7	Образовалась окисная пленка
Сплав С-816*	581,4	0,5	—
Нержавеющая сталь 316	—	79	—

* Состав сплава С-816: 18,5—20% хрома; 19—21% никеля; 42—44% кобальта; 3,5—4% молибдена; 3,5—4% ванадия; 3,5—4% кадмия; 0,35—0,45% углерода; не более 1% марганца; не более 1% кремния; остальное — железо.

С-816. Предпочтение было отдано сплаву инконель-Х, имеющему лучшую совместимость с оксидом церия в результате образования окисной пленки [4].

Как указывалось выше, термоэлектрический преобразователь установки расположен между внешним и внутренним слоями оболочки генератора. Коммутация термоэлементов из теллурида свинца по горячей стороне осуществляется медными пластинами, по холодной — медной проволокой. Элементы прижимаются к внутренней горячей оболочке пружинами, пространство между ними заполняется теплоизоляцией Мин-К 1301. Конструкция термоэлемента показана на рис. 7.21. Основные характеристики преобразователя:

Температура горячего спая, °С	538
Температура холодного спая, °С	169
К. п. д., %	5
Количество элементов, шт.	227
Коэффициент Зеебека (538—169° С), <i>мкВ/°С</i>	136
Удельное сопротивление (538—169° С), <i>мком·см</i>	600
Теплопроводность, <i>вт/(см·град)</i>	0,016
Добротность, <i>(град)⁻¹</i>	10⁻³
Длина термостолбика, <i>см</i>	1,67
Сечение термостолбика, <i>см²</i>	1

Разработка преобразователя включала облучение термоэлементов интегральным потоком до $4,6 \cdot 10^{16}$ электрон/см². При этом не было обнаружено заметных изменений веса и геометрических размеров элемента, но прочность теллурида свинца значительно снизилась, он стал хрупким. После облучения заметно снизился коэффициент Зеебека в диапазоне 350—500° С.

По программе СНАП-1А было изготовлено несколько опытных образцов генератора, которые испытывались с электрическим подогревом. Однако в процессе этих испытаний проектный уровень мощности не был достигнут (максимальная мощность 85 *вт* была получена только при испытании одного образца).

В 1961 г. работы по программе СНАП-1А были прекращены, по-видимому, из-за технических трудностей, возникших в процессе разработки проекта, а также в результате успешной эксплуатации солнечных батарей на первых искусственных спутниках Земли.

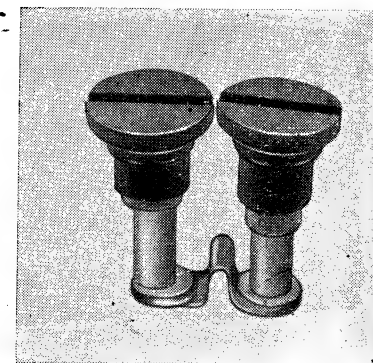


Рис. 7.21. Термоэлемент генератора СНАП-1А.

Генераторы типа СНАП-3. Исследования по программе СНАП-3 проводились фирмой «Мартин» параллельно с разработкой генератора СНАП-1. Эта программа носила общий исследовательский характер и имела целью определить возможность применения изотопных термогенераторов в космических установках. Интересно отметить, что впервые в США вопрос об использовании полупроводниковых термоэлементов возник в связи с работами по программе СНАП-3.

В отличие от программы СНАП-1, по которой было получено значительное количество экспериментальных данных, но не построено ни одного работающего генератора, программа СНАП-3 завершилась запуском первых установок в космическое пространство на спутниках «Транзит-4А» и «Транзит-4В». Всего по этой программе разрабатывалось двенадцать моделей. Некоторые из них были доведены только до стадии чертежей. Две первые модели типа СНАП-3А были довольно несовершенны по конструкции и давали мощность 1,6—1,7 *вт* с к. п. д. менее 1%. Выходная мощность во время работы регулировалась утечкой аргона из корпуса генератора. Следующая серия генераторов типа СНАП-3В, состоящая из восьми моделей, не имела специальной системы регулирования мощности. Три таких генератора, один из которых демонстрировался в 1959 г. президенту Эйзенхауэру, были загружены полонием-210. Два более поздних генератора усовершенствованной конструкции были загружены плутонием-238 и запущены в космос. Остальные модели использовались для испытаний без топлива. В табл. 7.20 приведены основные характеристики пяти генераторов, загруженных изотопным топливом.

Таблица 7.20

Характеристики генераторов типа СНАП-3* [4]

Характеристика	Тип генератора				
	3В1	3В2	3В4	3В7	3В8
Максимальная электрическая мощность, <i>вт</i>	2,4	2,5	4	2,7	2,7
Тепловая мощность, <i>вт</i>	48	55,6	69,4	52	52
К. п. д., %	5	—	5,75	5,2	5,2
Топливо	²¹⁰ Po	²¹⁰ Po	²¹⁰ Po	²³⁸ Pu	²³⁸ Pu
Активность топлива, <i>кюри</i>	1495	1738	2177	1600	1600
Термоэлектрический материал	PbTe	PbTe	PbTe	PbTe	PbTe
Температура горячего спая, °C	382	—	—	—	—
Температура холодного спая, °C	80	—	—	—	—
Количество термостолбиков, шт.	54	54	54	54	54
Материал изоляции	Мин-К	Мин-К	Мин-К	Мин-К	Мин-К
Материал корпуса	Латунь	Медь	Медь	Медь	Медь
Выходное напряжение, <i>в</i>	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Вес генератора, <i>кг</i>	2,3	1,8	1,8	2,1	2,1
Стоимость изготовления, долл.	15000	—	—	4800	4800

* Приведенные характеристики относятся к начальному периоду работы установок.

Топливо для генераторов СНАП-3В, изготовленное в Маундской лаборатории, заключалось в две ампулы из нержавеющей стали 304 (рис. 7.22) с толщиной стенки 0,76 *мм*, рассчитанные на загрузку по 1000 *кюри* полония в каждую. Ампулы заваривались и помещались в оболочку из нержавеющей стали 304 с толщиной стенки 0,86 *мм*, оболочка также заваривалась. Для предотвращения окисления оболочку из стали помещали во внешнюю оболочку из сплава Хейнес-25 (сплав никеля, хрома и кобальта). Для обеспечения надежного теплоотвода зазор между стальной оболочкой и внешней оболочкой из сплава Хейнес-25 заполнялся гелием под давлением 10 *атм*.

В генераторах СНАП-3В использовалась цилиндрическая геометрия: длинная ампула окружалась радиально расположенными термоэлементами. Отработанное тепло отводилось через цилиндрическую поверхность корпуса генератора.

Термоэлектрический преобразователь содержал 27 элементов (54 термостолбика) из теллурида свинца с добавкой висмута (*n*-тип) и натрия (*p*-тип). Термостолбики длиной 2,54 *см* имели разные диаметры (*n*-тип 0,57 *см*; *p*-тип 0,53 *см*).

По горячей стороне термоэлементы были скоммутированы железными пластинами, изолированными от внутренней оболочки корпуса пленкой из окиси алюминия, нанесенной плазменным напылением. Холодные спаи элементов опирались на алюминиевое кольцо, покрытое слоем изоляции. Для обеспечения хорошего теплового контакта термоэлементы прижимались пружинами к поверхности теплового блока. Каждый элемент был заключен в слюдяную втулку для предотвращения химического воздействия. Пространство между элементами заполнялось изоляцией Мин-К.

Корпус генератора почти сферической формы (диаметр 12,1 *см*, высота 14 *см*) состоял из двух спаянных между собой медных полушфер. Такая конструкция корпуса обеспечивала расплавление пайки в случае входа генератора в атмосферу и быстрое сжигание топливного блока при аэродинамическом нагреве на достаточно большой высоте. Корпус генератора заполнялся гелием под давлением 1 *атм*. Для обеспечения регулирования мощности была предусмотрена контролируемая утечка газа. Какой-либо специальной защиты не предусматривалось.

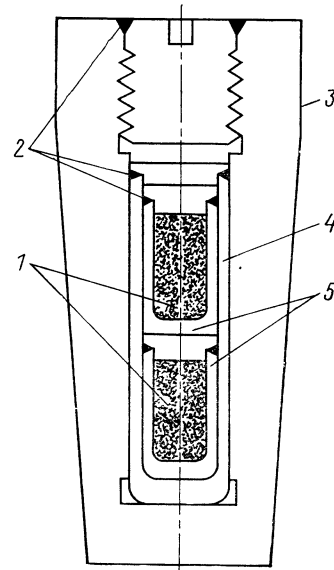


Рис. 7.22. Схематическое изображение теплового блока генератора СНАП-3В: 1 — топливо; 2 — сварные швы; 3 — корпус блока; 4 — наружная ампула; 5 — внутренняя ампула.

Загрузка 2177 кюри полония-210 создавала мощность дозы на поверхности корпуса генератора 400 *мр/ч* по γ -излучению и 12 *мбэр/ч* по нейтронам. По нормам КАЭ США допустимая доза для рук равна 1500 *мр/неделя*. Следовательно, этот генератор можно было держать в руках около 4 ч в неделю. За время работы, равное периоду полураспада полония-210, генератор СНАП-3В мог вырабатывать 9 *квт·ч* электроэнергии. Генераторы серии СНАП-3В были подвергнуты испытаниям, имитирующим условия запуска ракеты и работы в космическом пространстве. Вибрационные испытания с электронагревом обнаружили падение к. п. д. до 3,6%. Через 10 мин после испытаний генератор восстанавливал свои прежние характеристики. Генератор испытывался также на статические ускорения до 15 *g* и на удар до 50 *g* со временем нарастания 1 *мсек*. Тепловой блок прошел испытания на удар (давление 73 *кг/см²*), испытывался также в пламени керосина и кислот, имитирующем пожар на стартовой площадке. Все модели генератора этой серии успешно выдержали испытания.

В 1961 г. Маундская лаборатория изготовила плутониевое топливо для двух генераторов, в каждый из которых было загружено по 1600 кюри плутония-238. Запуск первого генератора на спутнике «Транзит-4А» произведен в июне 1961 г., а второго — в ноябре 1961 г. на спутнике «Транзит-4В». В космическом пространстве выходная мощность генератора упала на 10% из-за возрастания температуры холодных спаев на 56° К под действием космической радиации.

Первый генератор проработал в космосе несколько лет, второй прекратил подачу сигналов в июле 1962 г., как полагают, из-за замыкания конденсатора в блоке питания. Опыт разработки и эксплуатации генераторов серии СНАП-3В позволил создать более совершенные термоэлектрические генераторы космического назначения СНАП-9А, которые представляют собой дальнейшее развитие конструкции установки СНАП-3В на плутонии-238 [20].

Генератор СНАП-9А предназначался для питания аппаратуры специальных управляемых навигационных спутников ВМФ. Вес генератора 12,3 *кг*, электрическая мощность 25 *вт*, в качестве топлива использовался плутоний-238. Тепловой блок размещался в центре генератора, так же как в установке СНАП-3В. Термоэлектрические элементы из теллурида свинца, скомпонованные в 36 модулей усовершенствованной конструкции, крепились холодными спаями к корпусу шестигранной формы. Теплоизоляция обеспечивалась материалом типа Мин-К. Корпус снабжен шестью радиально расположенными излучающими ребрами. Внешний вид генератора показан на рис. 7.23.

Два генератора СНАП-9А запущены в космос в сентябре и декабре 1963 г. Третий генератор потерпел аварию при неудачном запуске спутника в апреле 1964 г.

Генератор типа СНАП-11. Управлением по авиации и исследованию космического пространства США (NASA) разра-

батывались космические корабли для посадки на Луну. В качестве бортового источника питания аппаратуры этих кораблей наряду с солнечными и химическими батареями предполагалось использовать термоэлектрический генератор.

Разработкой проекта такого генератора занимались фирмы «Вестингауз», «Хьюз», «Мартин» по контракту с КАЭ. Фирма «Вестин-

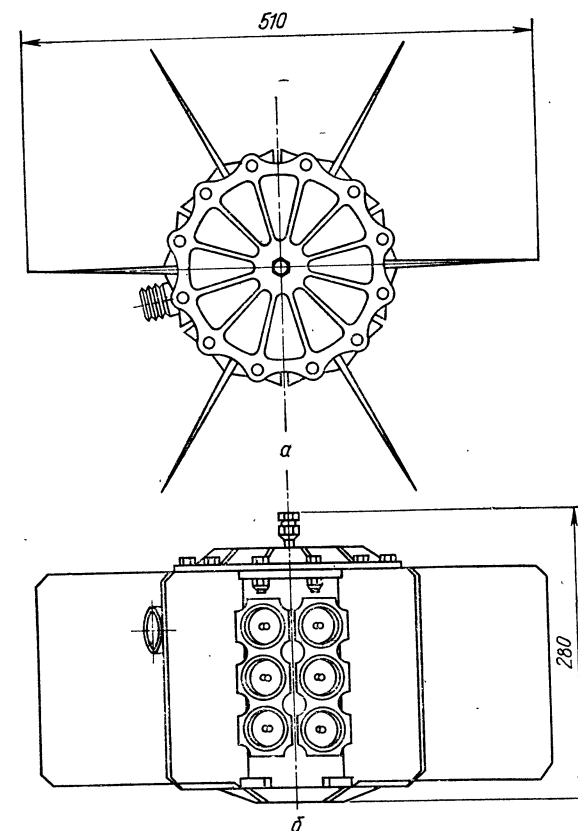


Рис. 7.23. Общий вид генератора СНАП-9А [вид сверху (а) и сбоку (б)].

гауз» разрабатывала генератор мощностью 50—60 *вт* со сроком службы три месяца, а фирма «Хьюз» — установку мощностью 30 *вт* со сроком службы три — шесть месяцев, фирма «Мартин» спроектировала и исследовала два опытных изотопных генератора электрической мощностью по 13 *вт*. Один из них предназначался для мягкой посадки на Луну со сроком службы до шести месяцев, второй — был рассчитан на эксплуатацию после жесткой посадки на Луну в течение 2—3 месяцев. С целью предотвратить нарушения при-

родного баланса тяжелых элементов на лунной поверхности было решено в качестве топлива использовать искусственный изотоп кюрий-242.

Помимо обычных требований, предъявляемых к конструкции космических генераторов, было введено еще одно требование, вызванное предполагаемым использованием аппаратуры, чувствительной к радиоактивному излучению.

γ -Излучение генератора с мягкой посадкой не должно превышать в космосе $7 \text{ фотон}/(\text{см}^2 \cdot \text{сек})$, а генератора с жесткой посадкой — $1 \text{ фотон}/(\text{см}^2 \cdot \text{сек})$ (в области энергий $0,4—3,0 \text{ Мэв}$) на площади 100 см^2 , расположенной на расстоянии 1 м от генератора. Основные характеристики генераторов приведены в таблице 7.21.

Т а б л и ц а 7.21
Характеристики лунных генераторов СНАП-11 [4]

Характеристика	Тип генератора	
	для мягкой посадки	для жесткой посадки
Максимальная электрическая мощность, <i>вт</i>	19	13
Тепловая мощность, <i>вт</i>	396	250
К. п. д., %	4,8	5,2
Изотоп	Кюрий-242	Кюрий-242
Активность изотопа, <i>кюри</i>	18.900	11.130
Материалы топливной ампулы	Хастеллой-С	Хастеллой-С
Термоэлектрический материал	PbTe	CoSi
Количество термоэлементов, шт.	30	64
Температура горячего спая, °C	538	750
Температура холодного спая, °C	210	240
Материал корпуса	—	Бериллий
Изоляция	Мин-К 2301	Темпорель-1500
Выходное напряжение, <i>в</i>	3	3
Вес (без защиты), <i>кг</i>	7,5	2,8
Срок службы, месяцы	6	2

Конструкция генератора, предназначенного для мягкой посадки на Луну, имеет некоторые узлы, похожие на узлы генератора СНАП-1А. Например, передача тепла от теплового блока к окружающей его цилиндрической оболочке термоэлектрического преобразователя осуществляется излучением. Система регулирования мощности имеет аналогичную конструкцию: дополнительный излучатель, открытый в начале работы генератора, постепенно закрывается шторками, приводимыми в движение шарнирно-поршневым механизмом в результате изменения объема сплава Na — К (см. рис. 7.6).

Тепловой блок имеет форму полного цилиндра. Топливо изготавливается из сплава кюрия с золотом в соотношении 1:5. Разбав-

ление золотом позволяет уменьшить удельную тепловую мощность источника, улучшить теплопередачу и использование тепла. Полый цилиндр более сложен в изготовлении, чем сплошной цилиндр, однако он дает возможность использовать внутреннюю полость как резервуар для накопления гелия, образующегося при распаде кюрия-242, а также снимает проблему высоких температур в центре цилиндра. Поскольку продукт распада кюрия-242 — плутоний-238, то для предотвращения коррозионного воздействия плутония топливный сплав заключен в тонкую танталовую оболочку. Тантал очень слабо взаимодействует с плутонием при рабочих температурах источника тепла.

Для получения начальной тепловой мощности 755 вт требуется $6,3 \text{ г}$ кюрия-242. Кюрий-242 производится в виде сплава, содержащего 55% америция, поэтому вес смеси 14 г . Вместе с золотом (70 г) общий вес тепловыделяющей смеси получается 84 г , а объем — $4,6 \text{ см}^3$.

По расчетам давление гелия во внутренней полости к концу срока службы достигнет $500 \text{ кг}/\text{см}^2$. Возникающие в связи с этим напряжения в танталовой оболочке толщиной $0,7 \text{ мм}$ в несколько раз превышают допустимые. Танталовую оболочку нельзя делать толстой, так как она должна сгореть после возвращения в атмосферу. Поэтому танталовая оболочка помещается в контейнер из сплава хастеллой-С, обладающего хорошей прочностью при высоких температурах ($500 \text{ кг}/\text{см}^2$ при 870°C) и удовлетворительной коррозионной стойкостью в морской воде. Вместе с тем этот сплав легко горит в условиях аэродинамического нагрева в атмосфере.

Остальные детали теплового блока изготавливают преимущественно из вольфрама, который имеет хорошую теплопроводность и служит эффективной защитой от γ -излучения.

Термоэлектрический преобразователь содержит 70 термоэлементов, соединенных последовательно-параллельно в электрическую цепь. Длина термоэлементов $12,5 \text{ мм}$, диаметр $9,2 \text{ мм}$ (*p*-тип) и $8,5 \text{ мм}$ (*n*-тип). Температура горячего спая $590—560^\circ \text{C}$, холодного — $240—210^\circ \text{C}$. В качестве термоэлектрического материала используется теллурид свинца с добавкой 1% натрия (*p*-ветвь) и $0,03\%$ (*n*-ветвь).

В конструкции термоэлектрического преобразователя предусмотрена свободная замена отдельных термоэлементов. Для снижения сублимации теллурида свинца термоэлектрический преобразователь помещают в атмосферу инертного газа. Коммутация термоэлементов осуществляется с помощью металлических пластин. В качестве электроизоляции используют окись алюминия.

Тщательное исследование показало, что значительное количество γ -квантов образуется в результате *n*-, γ -реакций в материалах внутреннего экрана и других узлов конструкции генератора. Для снижения интенсивности γ -излучения до заданной величины ($7 \text{ фотон}/(\text{см}^2 \cdot \text{сек})$ на расстоянии 10 см от источника тепла) введена

защита из вольфрама толщиной 3,8 см. Для наземного обслуживания генератора необходима дополнительная водяная защита (слой толщиной 4 см).

Ниже приведены уровни различных видов радиации (мр/ч) без защиты и с водяной защитой на расстоянии 1 м от источника, полученные через два месяца после загрузки кюрия-242 в ампулу.

Тип излучения	Без защиты	С водяной защитой
Нейтроны деления	110	48,6
γ-Кванты от деления	2,7	2,2
γ-Кванты от распада кюрия-242	12,6	8,8
К-захват	0,03	0,026
γ-Кванты от захвата нейтронов	0,015	0,013
Суммарный уровень	125,35	59,64

Оценка радиационной опасности в случае пожара на стартовой площадке показала, что контейнер с источником тепла расплавится и радиоактивный изотоп попадет в окружающую атмосферу. При этом, по расчетам фирмы «Мартин», образуется радиоактивное облако, которое поднимется на высоту до 26 м и будет двигаться по направлению ветра, возрастая в объеме по мере рассеяния. Результаты расчета количества кюрия-242, могущего попасть в организм человека в зависимости от расстояния до места аварии, приведены ниже. Эти данные получены для скорости ветра 3,8 м/сек (средняя для мыса Кеннеди), скорости вдыхания 500 см³/сек и степени усвоения кюрия организмом 0,12 вдыхаемого количества.

Расстояние от места аварии, м	Радиус облака, м	Количество кюрия, попавшего внутрь организма, мккюри
10	4,1	38 000
100	29,0	76,8
1 000	240	1,27
10 000	1 740	0,02

Если принять, что допустимое количество кюрия-242 в организме не должно превышать 0,2 мккюри, то лица, попавшие в радиоактивное облако на расстоянии до 3 км от места аварии, могут получить дозу, превосходящую эту норму. Поэтому должны приниматься достаточные меры к обеспечению прочности ампулы с радиоактивным материалом.

Конструкция генератора СНАП-11, предназначенного для жесткой посадки (рис. 7.24), претерпела некоторые изменения, вызванные прежде всего требованием, чтобы после посадки на лунную поверхность со скоростью до 165 м/сек генератор мог успешно продолжать работать.

В связи с этим выбрана прямоугольная форма теплового блока, на котором смонтировано 64 термоэлемента из силицида кобальта таким образом, что оси термоэлементов параллельны направлению

удара. Бериллиевый корпус генератора, по форме близкий к эллипсоиду вращения, передает тепло от термоэлементов верхнему излучателю и смягчающему удар сильфону, расположенному в нижней части генератора. Механизм регулирования мощности отсутствует из-за короткого срока службы (два месяца). Основные характеристики генератора приведены в табл. 7.21.

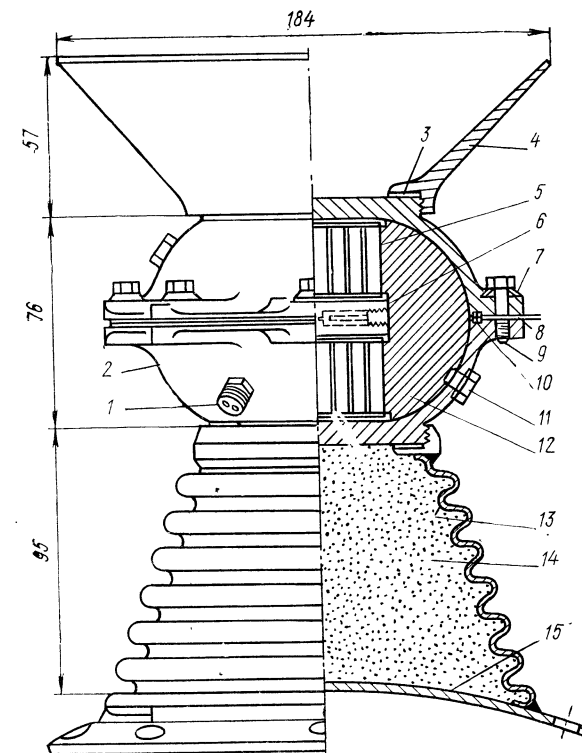


Рис. 7.24. Генератор СНАП-11, предназначенный для жесткой посадки на Луну (разрез):

1 — штуцер; 2 — корпус из бериллия; 3 — медная прокладка; 4 — излучатель; 5 — термоэлементы; 6 — ампула с топливом; 7 — пружина; 8 — прокладка из алюминиевого сплава; 9 — крепежный болт; 10 — изоляция; 11 — пробка; 12 — теплоизоляция; 13 — сильфонная опора; 14 — гелий (6,8 атм); 15 — подпирываемая поверхность.

Было изготовлено несколько прототипов генератора СНАП-11 обоих типов для испытаний в условиях, близких к эксплуатационным. Во время испытаний имитировались условия запуска ракеты, возможные аварии, а также условия работы на поверхности Луны, например, эксплуатация установки при колебании температуры от лунного дня (+110°С) до лунной ночи (— 150°С). Результаты этих

испытаний были использованы при разработке третьего генератора СНАП-11 мощностью 25 *вт*, предназначенного для зонда «Сервейер». Зонд «Сервейер» рассчитан для мягкой посадки на Луну, где он должен производить сейсмические и микрометеоритные измерения, анализ материалов и измерение физических характеристик лунной поверхности, телевизионное наблюдение и другие эксперименты. В качестве топлива в этом генераторе используется кюрий-242, срок его службы четыре месяца.

Конструкция этой установки во многом аналогична конструкции генератора СНАП-11 для мягкой посадки на Луну. В 1966 г. Ок-Риджской национальной лабораторией проведены 90-дневные испытания опытного образца установки СНАП-11. Мощность генератора достигала 20 *вт* при загрузке 20 *г* кюрия-242 [20].

Установка СНАП-27 и другие проекты космических генераторов.

По заданию КАЭ проводилась разработка одного из крупных изотопных термогенераторов СНАП-27 электрической мощностью 50—60 *вт*, предназначенных для проведения экспериментов на лунной поверхности по программе «Аполлон», предусматривавшей высадку на Луну двух космонавтов [21]. Космонавты оставили на Луне контейнер с научной аппаратурой и источником тока для передачи информации на Землю в течение примерно года. Основные характеристики установки СНАП-27:

Электрическая мощность, <i>вт</i>	56
Тепловая мощность, <i>вт</i>	1450
К. п. д., %	4
Изотоп	Плутоний-238
Загрузка плутония-238, <i>кг</i>	16,2
Диаметр ампулы, <i>см</i>	6,3
Длина ампулы, <i>см</i>	39,6
Термоэлектрический материал:	
<i>p</i> -ветвь	Теллурид свинца — теллурид олова
<i>n</i> -ветвь	Теллурид свинца
Температура горячего спая, °С	590
Температура холодного спая, °С	275
Тепло, проходящее через преобразователь, %	85
Диаметр установки (включая ребра), <i>см</i>	40
Высота установки, <i>см</i>	46
Количество ребер излучателя, шт.	8
Вес установки, <i>кг</i>	16,5
Срок службы, годы	До 1

Аналогичный генератор типа СНАП-19 мощностью 50 *вт* на плутонии-238 был запущен в 1969 г. на метеорологическом спутнике Земли «Нимбус» [22].

Фирма «Мартин» по контракту с КАЭ спроектировала четыре изотопных термогенератора мощностью по 500 *вт* каждый на полонии-210. Вес генератора СНАП-29 около 180 *кг*, предполагаемая

стоимость его разработки и изготовления порядка 10 млн. долл. Эта установка предназначена для обитаемых космических станций, находящихся на околоземных орбитах в течение 1—2 месяцев, а также для обеспечения нужд экипажа, высадившегося на Луне [23].

По заданию КАЭ ведется изучение потенциальных возможностей термоэлектрических генераторов на полонии-210, плутонии-238 и кюри-244 электрической мощностью до 10 *квт* применительно к космическим установкам. Эта мощность рассматривается как практический предел для радиоизотопных генераторов такого назначения. Следует заметить, что КАЭ ведет разработку ракетных двигателей с изотопными источниками тепла. Тепло, выделяющееся при распаде полония-210, используется для подогрева жидкого водорода. Такой двигатель может развивать тягу до 0,11 *кГ* при удельном импульсе 700—800 *сек*. Вес двигателя 13 *кГ*, длина 43 *см*, диаметр 10 *см*.

Разработка космических изотопных генераторов ведется также в странах Западной Европы. Наибольшие успехи в этой области достигнуты во Франции и ФРГ. В 1966 г. во Франции изготовлен демонстрационный изотопный генератор электрической мощностью 0,3 *вт* (тепловая мощность 6,4 *вт*) на полонии-210 (загрузка 200 *кюри*), весом 0,5 *кГ*, к. п. д. генератора 4,7%, в качестве термоэлектрического материала использован теллурид висмута. Другая установка была изготовлена в 1968 г., электрическая мощность ее 12,5 *вт*, в качестве топлива использовался титанат стронция в ампуле из хастеллоя-С. Термоэлектрические элементы из кремний-германиевого сплава имели температуру на горячем спае 900° С, на холодном — 250° С. Вес генератора без защиты 8 *кГ*, к. п. д. 4,7% [24].

Французская программа предусматривает разработку нескольких прототипов термогенераторов космического назначения на полонии-210 и стронции-90. Комиссариатом по атомной энергии Франции организованы работы по получению радиоактивных изотопов из продуктов деления урана применительно к производству генераторов космического назначения.

В ФРГ изотопные источники энергии разрабатывают некоторые частные фирмы. В 1965 г. в Мюнхене экспонировалась модель изотопного космического генератора электрической мощностью 50 *вт* с к. п. д. 6%. В стадии разработки находится установка для спутника электрической мощностью 10 *вт* на стронции-90. Удельный вес генератора 0,5 *кГ/вт*, к. п. д. — 6%, температура горячих спаев кремний-германиевых элементов 830° С, а холодных — 270° С.

Фирма «Сименс-Шукерт» (ФРГ) разрабатывает изотопный генератор мощностью 125 *вт* на стронции-90. В 1966 г. проведены испытания опытного образца установки с кремний-германиевыми термоэлементами: достигнута мощность 100 *вт* и к. п. д. 4,2%. Как полагают, проектный уровень мощности будет достигнут вследствие улучшения теплового режима генератора.

Фирмой «Сименс-Шукерт» проводился также анализ генераторов электрической мощностью 100 *вт*, работающих на различных видах изотопного топлива, с к. п. д. 6% при температуре горячего спая 830° С и холодного спая — 280° С. Получены следующие значения удельного веса: для SrTiO_3 — 0,45; PuO_2 — 0,28; Sm_2O_3 — 0,15; As_2O_3 — 0,12 *кг/вт*. Фирмой «Юнкерс» проведена разработка изотопного электрогенератора на стронции-90 с динамическим преобразованием энергии (цикл Ренкина) мощностью 0,5 — 3 *квт* с к. п. д. 12%. Фирма считает, что подобный генератор на стронции-90 может конкурировать как по экономике, так и по весу с реакторной энергетической установкой до мощности в несколько киловатт [24].

§ 8.1

Общая часть

Источники энергии относятся к одному из основных факторов, определяющих развитие производительных сил общества. В природе существует много различных источников, потенциальная энергия которых может быть использована для удовлетворения потребностей человека, как то: химическое топливо, энергия рек и морских приливов, солнечная энергия, энергия ветра, термальных вод и др. Однако на современном этапе развития производительных сил основной источник энергии — химическое топливо, запасенное в земной коре. Запасы этого топлива, как известно, ограничены и не возобновляются, т. е. через некоторое время они будут полностью исчерпаны. В связи с этим возникает необходимость в более эффективном использовании известных и открытии новых источников энергии, способных заменить химическое топливо.

Один из возможных заменителей химического топлива — атомная энергия. Открытие деления ядер урана под действием нейтронов, позволившее использовать огромные запасы энергии, заключенные в атомном ядре, является выдающимся научно-техническим достижением. При использовании разведанных к настоящему времени запасов урана можно рассчитывать на увеличение в несколько раз имеющихся энергетических ресурсов. Ядерное топливо обладает существенными преимуществами по сравнению с химическим топливом.

1. Сгорание 1 *кг* урана-235 в ядерном реакторе по тепловыделению эквивалентно сгоранию 1800 *т* нефти. Такая высокая концентрация энергии позволяет существенно сократить расходы на транспортировку топлива особенно в районы, не имеющие собственных топливных ресурсов.

2. В результате деления урана-235 не только выделяется тепловая энергия, но и образуется новое ядерное топливо — плутоний. Причем при определенных условиях плутония может образоваться больше, чем сгореть урана.

3. Если максимальная температура при горении химического топлива достигает 3000° С, то в ядерном реакторе теоретически может быть получена температура в несколько миллионов градусов. Это обстоятельство открывает широкие перспективы создания в будущем высокотемпературных термодинамических циклов с хорошей эффективностью использования источника энергии.

4. В отличие от горения процесс деления ядер не требует наличия окислительной среды (кислород, воздух), поэтому ядерные реакторы успешно могут работать в инертной атмосфере и вакууме. Это позволяет использовать реакторы в подводном флоте и на космических установках.

Указанные особенности ядерного топлива способствовали относительно быстрому развитию атомной энергетики. Если первая АЭС мощностью 5 Мвт была пущена в СССР в 1954 г., то к 1967 г. мощность действующих в нашей стране атомных электростанций достигла 1 млн. кВт, а во всем мире 9 млн. кВт. Предполагается, что мощность АЭС в мире к 1980 г. составит около 250 млн. кВт.

В современных АЭС тепло, генерируемое в ядерном реакторе, с помощью турбины преобразуется в механическую энергию, которая затем в генераторе превращается в электричество. Однако этот способ преобразования не позволяет полностью использовать преимущества ядерного топлива. Например, максимальная температура пара в турбине не превышает 550—600° С, а температура ядерного топлива в реакторе достигает 2000° С и более. Поэтому в целях повышения эффективности использования реакторных источников тепла за последние годы начали исследовать непосредственные способы преобразования энергии, в том числе с применением термоэлектричества.

§ 8.2

Реакторные установки с термоэлектрическим циклом

Исследования термоэлектрического способа преобразования энергии с реакторным источником тепла ведутся применительно к потребностям наземной и космической энергетики. Работы по созданию термогенераторов с реакторным источником тепла, начатые в пятидесятых годах, привели к сооружению опытных энергетических установок «Ромашка» и СНАП-10А космического назначения. Ведутся также разработки нескольких проектов энергетических установок для использования под водой. В табл. 8.1 приведены основные характеристики некоторых из этих установок.

Разработки реакторных термогенераторов космического назначения начались несколько раньше и достигли, как видно из таблицы, более высокой стадии, чем работы по созданию наземных установок. В процессе разработки космических термогенераторов изучались в основном два типа реакторов: высокотемпературный на быстрых нейтронах без теплоносителя (СССР) и на тепловых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (США).

Выбор реактора для космического термогенератора существенно ограничен требованиями минимального веса, а также наличием высокого вакуума, невесомости в космосе и необходимостью сброса тепла излучением. Минимальный вес энергетической установки может быть достигнут в результате использования, во-первых, мало-

Таблица 8.1

Характеристики реакторных термогенераторов

Характеристика	Тип установки				
	«Ромашка»	СНАП-10А	Установка, охлаждаемая излучением	Установка с тепловыми трубами*	Установка фирмы «Мартин»
Электрическая мощность, кВт	0,5—0,8	0,5	5	130	100
Тепловая мощность, кВт	40	34	260	1740	2500
Топливо	UC ₂	U+Zr	UC	UN	UO ₂
Максимальная температура топлива, °С	1800	585	1970	1980	1080
Способ охлаждения реактора	Посредством теплопроводности	Теплоноситель Na K-78	Излучение	Тепловые трубы	Вода под давлением
Замедлитель	Нет	Гидрид циркония	Нет	Нет	Вода
Термоэлектрический материал	SiGe	SiGe	PbTe	—	Сплав на основе Pb, Te, Bi, Sb
Назначение	Космические установки	Космические установки	Космические установки	Космические установки	Подводные установки

* В установке предусматривается термоэмиссионное преобразование энергии.

габаритного реактора, поскольку вес защиты и установки в целом сильно зависит от размеров активной зоны, и, во-вторых, излучателя с малой поверхностью, обеспечивающего сброс тепла при высокой температуре. Последнее обстоятельство требует применения высокотемпературного реактора.

Среди реакторов на тепловых нейтронах наиболее малогабаритными являются реакторы с водяным замедлителем. Однако необходимость высокой рабочей температуры в активной зоне приводит к значительным давлениям пара (табл. 8.2), тяжелому корпусу реактора и другим трудностям. Поэтому водяные системы не могут быть использованы в космосе прежде всего по весовым характеристикам.

Если вместо воды взять высокотемпературный (700—900° С) водородсодержащий материал, например гидрид циркония, а в качестве теплоносителя использовать жидкий металл, то реактор такого типа может удовлетворить условиям работы в космосе. Это подтверждено эксплуатацией установки СНАП-10А в космическом пространстве.

Основные свойства жидких металлов, которые используются или могут быть использованы в дальнейшем как теплоносители, приведены в табл. 8.3.

Таблица 8.2

Физические свойства водяного пара [1]

Характеристика	Температура, °C				
	180	270	400	500	600
Давление, кг/см^2	10,2	56,1	100	150	250
Коэффициент теплопроводности, $\text{ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$	0,58	0,51	0,06	0,075	0,097
Теплоемкость, $\text{ккал}/(\text{кг} \times \text{град})$	1,16	1,23	0,74	0,69	0,711
Вязкость, $10^6 \text{ кг} \cdot \text{сек}/\text{м}^2$	1,54	1,95	2,57	3,05	3,61

Таблица 8.3

Физические свойства некоторых жидких металлов [2, 3]

Характеристика	Металл							
	Na	K	NaK-78	Bi	Pb	Pb-Bi	Rb	Li
Плотность при 600° С, $\text{кг}/\text{м}^3$	805	704	729	9660	10360	10000	1280	484
Температура плавления, °C	97,8	63,7	-12,3	271	327,4	123,5	39	186
Температура кипения, °C	878	760	784	1490	1740	1670	702	1317
Удельная теплоемкость при 600° С, $\text{ккал}/(\text{кг} \cdot \text{град})$	0,305	0,184	0,223	0,036	0,035	0,035	0,087	0,087
Коэффициент теплопроводности при 600° С, $\text{ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$	52,1	26,6	25,5	14,9	13,7	13,6	15,8	41,3
Давление паров при 500° С, мм рт. ст.	26	128	95—100	$6 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	—	100	$5 \cdot 10^{-2}$
Сечение захвата тепловых нейтронов, барн	0,536	2,07	—	0,034	0,17	—	0,17	0,033
Сечение захвата нейтронов с энергией 100 кэв, мбарн	1,1	5,5	—	3,0	4,0	—	4,0	0,025
Коэффициент K^* , характеризующий мощность на перекачку	5,3	24,6	16,9	—	—	—	56,6	0,63

* Коэффициент мощности, затрачиваемой на перекачку, определяется из выражения

$$K = \eta^0 \cdot \rho^2 / (\rho^2 c_p^{2,75}).$$

где η — динамическая вязкость, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{сек})$, ρ — плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 c_p — удельная теплоемкость, $\text{ккал}/(\text{кг} \cdot \text{град})$.

Реакторы на быстрых нейтронах более перспективны для использования в космосе, чем реакторы на тепловых нейтронах, поскольку из-за отсутствия замедлителя они имеют более компактную активную зону при эквивалентной мощности и позволяют получить высокую рабочую температуру цикла. Пример такого реактора — реактор установки «Ромашка», в котором максимальная температура топлива из дикарбида урана достигала 1800° С (см. § 8.3). В реакторе отсутствует теплоноситель, отвод тепла из активной зоны к термоэлектрическому преобразователю осуществляется вследствие теплопроводности материалов активной зоны и отражателя. Это обстоятельство позволяет исключить движущиеся узлы и механизмы и обеспечить тем самым высокую надежность энергетической установки в процессе ее эксплуатации. Например, установка «Ромашка» проработала без аварий около 15 000 ч. Однако с помощью теплопроводности довольно трудно из малогабаритной активной зоны передать высокие тепловые потоки к системе преобразования энергии, что ограничивает мощность энергетической установки.

Другой пример системы без теплоносителя — установка с реактором на быстрых нейтронах, в которой передача тепла из активной зоны к термоэлектрическому преобразователю осуществляется излучением.

Проект такой установки описан в работе [4]. Для простоты расчета была выбрана сферическая форма конструкции реактора, термогенератора и излучателя (рис. 8.1). Активная зона реактора диаметром 60 см удерживается в центре сферы с помощью 16 стержней, которые опираются на внутреннюю оболочку термоэлектрического преобразователя. В качестве топлива выбран карбид урана.

Термоэлементы цилиндрической формы в количестве 1000 шт. монтируются между внутренней горячей оболочкой и внешней оболочкой-излучателем. Система управления реактором и теньевая защита расположены на внешней оболочке. В качестве термоэлектрического материала был выбран теллурид свинца, который и определял верхнюю температуру (700° С) термоэлектрического цикла. Температура холодных слоев термоэлементов определялась из условия

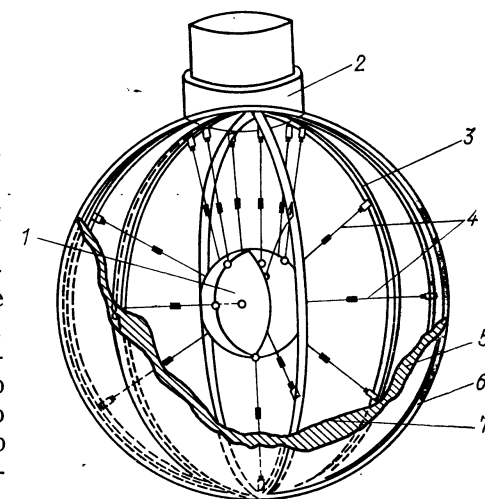


Рис. 8.1. Реактор-термогенератор с передачей тепла излучением:

1 — реактор; 2 — теньевая защита; 3 — рама; 4 — стержни крепления реактора; 5 — термоэлементы; 6 — внешняя оболочка-излучатель (6 секций); 7 — внутренняя оболочка (6 секций).

минимальной площади излучателя. В данном случае эта площадь оказалась равной $14,8 \text{ м}^2$, а радиус сферического излучателя — 114 см (5% поверхности излучателя занимает теневая защита). Примерные характеристики такой системы.

Электрическая мощность, кВт	5
Тепловая мощность, кВт	260
Общий к. п. д., %	1,92
Удельная мощность, Вт/кг	9,9
Температура, °С:	
в центре реактора	1970
на поверхности реактора	1245
горячего спая термоэлементов	700
холодного спая	493
Вес, кг:	
реактора (активная зона и отражатель)	305
излучателя	122
термоэлектрических элементов	20
прочие детали и узлы	51
Общий вес установки без защиты, кг	508
Диаметр всей установки, см	228
Длина теплоэлемента, см	0,63
Диаметр ветвей р-типа, см	0,57
Диаметр ветвей п-типа, см	0,71
Термоэлектрический материал	Теллурид свинца

Наряду с указанными выше системами за последние годы начаты разработки реакторных установок, охлаждаемых тепловыми трубами. Исследования теплопередачи с помощью тепловых труб начаты несколько лет назад и уже первые результаты показали перспективность этого направления особенно для космических установок.

Тепловые трубы представляют собой очень простое по конструкции и эффективное устройство, способное передавать в сотни раз большую тепловую энергию на единицу веса, чем такие металлы, как медь и серебро (теплопроводность тепловой трубы в 1000 раз больше, чем у меди). Тепловые трубы не требуют насосов, сальников и различного рода уплотнений, что позволяет повысить надежность и срок службы энергетической установки. Они могут быть использованы для передачи тепла при высоких температурах, что очень важно в случае космических установок.

Тепловые трубы относятся к системам, в которых циркуляция теплоносителя осуществляется капиллярными силами. Принципиальная схема тепловой трубы показана на рис. 8.2, система состоит из трубки с запаянными торцами, теплоносителя и фитиля с капиллярной структурой. При подогреве одного конца трубки теплоноситель, заполняющий фитиль, испаряется и пар вследствие разности давлений движется к холодному концу трубки и конденсируется на его поверхности. Под действием капиллярных сил конденсат возвращается по фитилю к горячему концу трубки, осуществляя таким образом циркуляцию теплоносителя.

На поверхности фитиля жидкость образует мениск с радиусом кривизны, равным или большим размера капилляра. Давление жидкости на холодном и горячем концах фитиля равно $p_1 - (2\gamma/r_1)$ (в конденсаторе) и $p_2 - (2\gamma/r_2)$ (в испарителе), где p_1 и p_2 — давление пара в конденсаторе и в испарителе соответственно; γ — сила поверхностного натяжения; r_1 и r_2 — радиусы кривизны мениска в конденсаторе и в испарителе соответственно. Перепад

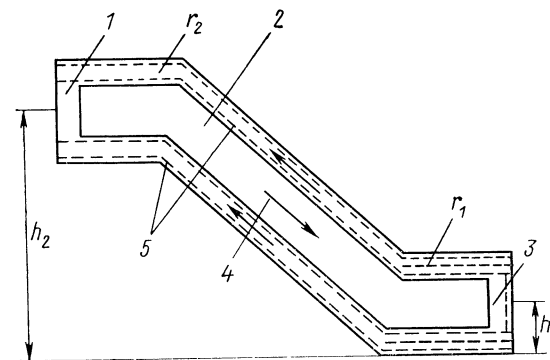


Рис. 8.2. Схема тепловой трубы:

1 — испаритель; 2 — паровой канал; 3 — конденсатор; 4 — фитиль; 5 — радиусы кривизны мениска в конденсаторе и испарителе; h_1 , h_2 — соответственно высоты центров горячего и холодного концов трубы.

давления вдоль фитиля, который заставляет жидкость двигаться от конденсатора к испарителю против силы тяжести, равен

$$p = 2\gamma [(1/r_2) - (1/r_1)] - (p_2 - p_1) - \rho g (h_2 - h_1), \quad (8.1)$$

где ρ — плотность жидкости; g — ускорение силы тяжести; h_1 и h_2 — соответственно высоты уровней жидкости в конденсаторе и испарителе относительно некоторого исходного уровня. При соответствующем выборе капилляров p может быть положительным. В случае использования тепловой трубы в установках космического назначения последний член уравнения (8.1) равен нулю из-за отсутствия сил гравитации. Поэтому в космическом пространстве режим работы тепловой трубы значительно упрощается.

В 1963 г. сотрудники Лос-Аламосской научной лаборатории Гровер и др. исследовали теплопередачу с помощью тепловых труб [5]. В экспериментах использовались трубы из нержавеющей стали внешним диаметром 19 мм, толщиной стенки 1,5 мм и длиной 90 см. Фитилем служила сетка с отверстиями диаметром 0,15 мм, изготовленная из проволоки из нержавеющей стали диаметром 0,13 мм. Сетка, сложенная в пять слоев, плотно прижималась к внутренней стенке трубы таким образом, что в центре оставался канал диамет-

ром 13 мм для прохода пара. В трубу загружали 40 г твердого натрия, затем труба откачивалась и герметизировалась.

Трубу помещали в вакуумную камеру, один конец ее нагревался электронным пучком. При этом температура натрия достигала 1100° К, а входная мощность составляла 1 кВт. Нагреваемый конец трубы располагался на 4 см выше холодного. Профиль температуры вдоль трубы измерялся с помощью термопар. Полученные результаты приведены на рис. 8.3.

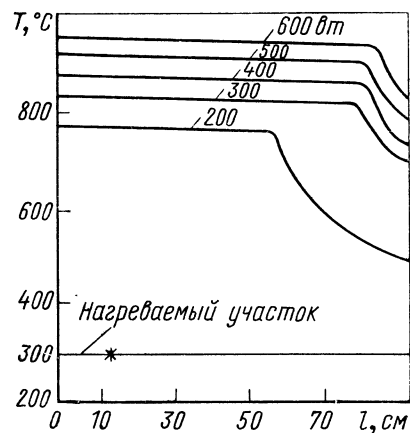


Рис. 8.3. Распределение температуры вдоль тепловой трубы.

Область резкого спада температуры у холодного конца трубы обусловлена, по мнению авторов, присутствием газообразного водорода, который выделялся из металлического натрия в результате обратимой реакции $\text{NaH} \rightarrow \text{Na} + 0,5\text{H}_2$. Результаты измерений показали, что градиент температуры вдоль тепловой трубы составлял не более 0,05° К/см. На участке обратного потока теплоносителя тепловая труба вела себя как твердое тело с теплопроводностью выше $4,18 \cdot 10^5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}$ (теплопроводность меди $390 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}$). Была сделана попытка передать 30 Вт/см^2 через поверх-

ность нагреваемого участка трубы, которая привела к локальному перегреву в результате высыхания и деформации фитиля.

В работе Шиндлера и Воннера приведено теоретическое обоснование возможности применения тепловых труб для передачи тепла [6]. Используя элементарную модель (см. рис.8.2), авторы произвели расчет теплопередачи и определили оптимальные геометрические параметры для тепловых труб с натриевым теплоносителем. Было получено следующее выражение для оптимального произведения мощности на длину трубы:

$$(Nl)_{\text{опт}} = q\gamma F_{\text{п}} d_{\text{п}}^2 / (16\nu_{\text{п}} d_{\text{ж}}) = q\gamma F_{\text{ж}} d_{\text{ж}} / (16\nu_{\text{ж}}), \quad (8.2)$$

где N — входная мощность; l — длина тепловой трубы; q — теплота парообразования; γ — сила поверхностного натяжения; $F_{\text{п}}$ — сечение канала для прохода пара; $F_{\text{ж}}$ — сечение фитиля; $\nu_{\text{п}}$ — кинематическая вязкость пара; $d_{\text{п}}$ — гидравлический диаметр парового канала; $d_{\text{ж}}$ — гидравлический диаметр капилляра для жидкости; $\nu_{\text{ж}}$ — вязкость жидкости.

Перепад температур на тепловой трубе можно определить по формуле

$$\Delta T = 2T\gamma / (q\rho_{\text{п}} d_{\text{ж}}),$$

где $\rho_{\text{п}}$ — плотность пара; T — температура в испарителе трубы.

На основе этих расчетов построена диаграмма для определения оптимальных геометрических параметров тепловых труб с натриевым теплоносителем, работающих при температуре 900° К. На диаграмме (рис. 8.4) расходящиеся прямые соответствуют точкам с одинаковым сечением фитиля $F_{\text{ж}}$. Гиперболические кривые соединяют точки с равными гидравлическими диаметрами парового

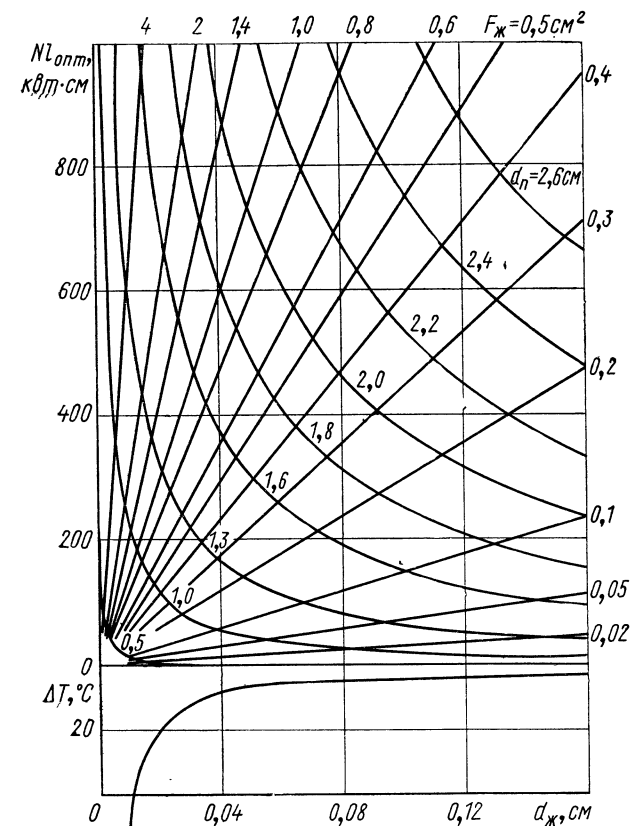


Рис. 8.4. Диаграмма для выбора оптимальных геометрических параметров тепловых труб.

канала $d_{\text{п}}$. По оси абсцисс отложены оптимальные значения диаметра капилляра $d_{\text{ж}}$, по оси ординат — произведение мощности на длину трубы (вверх) и перепад температур на трубке (вниз). Точка пересечения прямой и гиперболы соответствует оптимальным параметрам тепловой трубы. Например, для передачи мощности в 10 кВт по трубе длиной 60 см требуется диаметр парового канала 1,8 см, фитиль сечением 1 см² с капиллярами диаметром 0,04 см. Перепад температур на тепловой трубе при этом составит 10° С.

Буссе и др. [7] провели исследование материалов, которые могут быть использованы в качестве теплоносителей для тепловых труб. Результаты экспериментов показали, что при рабочей температуре около 1000°C в качестве теплоносителя можно рекомендовать литий, а в качестве материала трубы — сплав ниобия с 1 вес. % циркония. При температуре 1600°C наиболее подходящим теплоносителем может оказаться свинец в сочетании с тепловой трубой из тантала. Эти результаты подтверждаются экспериментами Коттера, Гровера и др., которые показали удовлетворительную совместимость в статических условиях таких теплоносителей, как серебро, индий и свинец с танталом, при температуре до 1800°C в течение 1000 ч [8]. Литий практически не взаимодействует со сплавом ниобий — цирконий (1 вес. %) в диапазоне температур $900\text{—}1300^{\circ}\text{C}$. Например, в одном из экспериментов такая система проработала около 4000 ч при температуре 1100°C без заметного снижения теплопередачи. Общая масса перекачанного лития составила 720 кг. В другом эксперименте с трубкой из тантала и серебром в качестве теплоносителя за 100 ч работы при температуре 1900°C было перекачано 200 кг серебра. При этом имел место перенос тантала в количестве $3 \cdot 10^{-9} \text{ г/дл}$, что соответствует растворимости тантала в серебре порядка $10^{-3} \%$. Растворимость материала трубы играет важную роль, поскольку теплоноситель в тепловой трубе подвергается многократной дистилляции и в случае заметного растворения материал трубы будет осаждаться на фитиле и забивать капилляры, нарушая подачу жидкости в испаритель.

В табл. 8.4 приведены характеристики некоторых материалов, которые могут быть использованы как теплоносители для тепловых труб. С точки зрения получения максимального теплового потока при рабочей температуре до 1500°C в качестве теплоносителей могут быть рекомендованы калий, натрий, литий. Для более высоких температур можно рассматривать свинец, серебро и индий.

Таблица 8.4

Характеристики некоторых теплоносителей для тепловых труб [9]

Материал	Характеристика				
	Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$	Температура кипения, $^{\circ}\text{C}$	Плотность, кг/м^3	Теплота испарения, ккал/кг	Поверхностное натяжение, 10^3 кг/м
Аммиак	$-77,7$	-28	680	324	0,28
Вода	0	100	1000	539	1,17
Цезий	28,5	704	1800	145	0,82
Калий	63,7	760	820	490	1,57
Натрий	97,3	878	940	1000	2,84
Литий	186	1317	510	4650	5,93
Свинец	327	1740	10500	200	6,7
Индий	156	2080	7000	465	9,4
Серебро	960	2152	9300	550	13,8

Следует заметить, что теплоноситель не должен иметь слишком высокую температуру плавления и низкое давление пара, так как в этом случае требуется предварительный подогрев системы. Указанный подогрев является серьезным препятствием к использованию тепловой трубы особенно в условиях космоса.

В последнее время появились сообщения об использовании тепловых труб в конкретных конструкциях энергетических установок.

Например, фирма «Рэдио корпорейшн оф Америка» по заданию Армии США разрабатывает термоэмиссионный генератор мощностью 3 кВт на органическом топливе [10]. Генератор состоит из 36 преобразователей-диодов, собранных в три секции. Каждая секция генерирует мощность около 1 кВт. Для передачи тепла от источника к горячей стороне каждого преобразователя используется литиевый теплоноситель, циркулирующий в тепловых трубах, изготовленных из молибденового сплава. Длина трубы 229 мм, диаметр 18,3 мм, рабочая температура 1350°C . В качестве фитиля используется молибденовая сетка, сложенная в несколько слоев. По тепловой трубе подается мощность около 1 кВт, при этом перепад температуры вдоль трубы составляет менее 1°C . Общий к. п. д. установки 5—6%, а вес — 68 кг. Испытания лабораторного образца диода показали возможность получения электрической мощности порядка 80—90 Вт (проектная мощность 100 Вт).

В работе [11] приведено описание проекта энергетической установки космического назначения с реактором на быстрых нейтронах тепловой мощностью 860 кВт. Реактор выбран в форме полого шара с топливом из карбида урана-235 (60 мол. %) и карбида циркония (40 мол. %) и с графитовым отражателем толщиной 5 см. К поверхности отражателя примыкает катод термоэмиссионного элемента площадью 30 см^2 . Анод элемента соединен с тепловой трубой, которая отводит тепло к шаровой оболочке-излучателю. Схема установки показана на рис. 8.5.

Стальная тепловая труба с внутренним диаметром 2 см, длиной 65 см и толщиной стенки 0,3 мм имеет массу на единицу длины 3 г/см. Фитилем служит стальная сетка, сложенная в пять слоев, теплоноситель — натрий. Примерные весовые характеристики основных узлов установки:

Ядерное топливо, кг	536
Отражатель, кг	107
Электроизоляция из BeO , кг	9
Бериллиевая защита оболочки-излучателя, кг	115
Конструкционные элементы и тепловая труба, г	228
Фитиль тепловой трубы, г	96
Тепловая труба в сборе, г	487
Общий вес тепловых труб, кг	210
Общий вес установки, кг	977
Относительный вес установки, кг/кВт	11,4

Проект другой более мощной (130 кВт) космической установки с тепловыми трубами (рис. 8.6) описан в работе [12]. Источник тепла в данном случае — реактор на быстрых нейтронах с топливом из

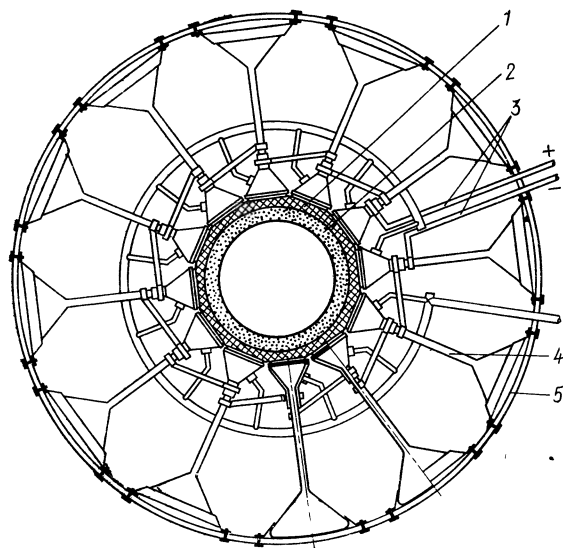


Рис. 8.5. Сферический реактор, охлаждаемый тепловыми трубами:

1 — графитовый отражатель; 2 — активная зона из UC — ZrC; 3 — шины; 4 — тепловая труба; 5 — оболочка-излучатель.

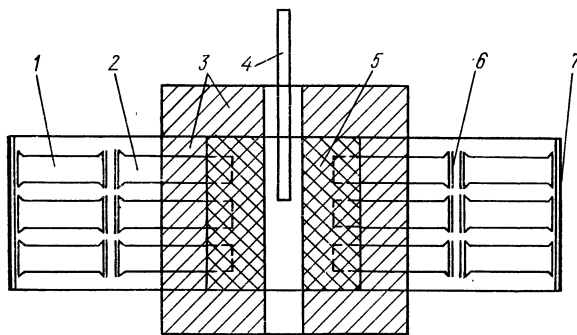


Рис. 8.6. Цилиндрический реактор, охлаждаемый тепловыми трубами:

1 — внешняя тепловая труба; 2 — внутренняя тепловая труба; 3 — отражатель; 4 — регулирующий стержень; 5 — активная зона; 6 — преобразователь энергии; 7 — излучатель.

нитрида урана или нитрида плутония. Реактор цилиндрической формы высотой 51 см и диаметром 35,5 см окружен молибденовым отражателем толщиной 10 см по радиусу и 6 см по оси. Топливо в виде пластин заключено в вольфрамовую оболочку толщиной 0,5 мм. Предполагается, что максимальная температура топлива не превысит температуру плавления нитрида урана.

Тепло от активной зоны реактора отводится с помощью тепловых труб к катоду термоэмиссионного элемента, анод которого также охлаждается с помощью других тепловых труб, соединенных с излучателем. Тепловая труба изготавливается из тантала толщиной 0,5 мм, в качестве теплоносителя используется литий-7. Среди жидких металлов литий имеет самую высокую теплоту испарения $19,6 \cdot 10^6$ Дж/кг. В данной конструкции можно также использовать свинец. Из-за очень низкой плотности паров лития в тепловую трубу предполагается добавить неконденсируемый газ (гелий), чтобы обеспечить работу трубы в период пуска установки. При низком тепловом потоке гелий вследствие конвекции поступает из испарителя в конденсатор тепловой трубы. По мере роста температуры давление паров лития в испарителе возрастет и дальнейшая теплопередача будет осуществляться с помощью лития. Тепловая труба проходит через отражатель, а ее испаритель углублен в активную зону на 8 см. Температура в испарителе 1770°K , плотность теплового потока через стенку трубы достигает 250 Вт/см^2 . Как показали эксперименты, из-за очень низкого давления паров литиевые тепловые трубы не могут работать при температуре ниже 1070°K . Поэтому для охлаждения анода, работающего при 1000°K , можно использовать тепловые трубы с цезиевым теплоносителем. Основные проектные характеристики установки:

Электрическая мощность, кВт	130
Тепловая мощность, кВт	1740
Общий к. п. д., %	7,5
Топливо	UN
Максимальная температура топлива, $^\circ \text{C}$	1977
Температура оболочки топлива, $^\circ \text{C}$	1497
Число тепловых труб, шт.	120
Диаметр излучателя, м	5,4

Для наземных установок, где нет таких жестких ограничений по весу и габаритным размерам, как в космосе, выбор типа реактора более широк. В этом случае важную роль играет рабочая температура термоэлектрического материала. Например, термоэлементы из высокотемпературного материала (до 1000°C) целесообразно располагать в активной зоне реактора, объединив их непосредственно с твэлом. Фирмой «Вестингауз электрик» изучалась возможность объединения твэла с термоэлектрическим преобразователем [4]. При этом рассматривалась конструкция элемента, состоящего из топлива, заключенного в металлическую оболочку, к которой прижимаются горячие спаи термоэлементов. Термоэлементы в свою очередь заключаются в оболочку, охлаждаемую теплоносителем.

Термоэлементы из низкотемпературных термоэлектрических материалов (до 300°C) можно располагать на первом контуре энергетического реактора. Один из примеров такой установки — вариант конструкции термогенератора большой мощности — описан в работе [13]. Конструкция представляет собой батарею термоэлементов, расположенных между двумя цилиндрическими трубами (рис. 8.7). По внутренней трубе циркулирует горячий теплоноситель, а внешняя труба охлаждается водой. Это устройство имитировало узел термогенератора мегаваттной мощности, в котором термоэлементы, расположенные на первом контуре, нагреваются теплоносителем ядерного реактора. Горячие спаи термоэлементов прижимались к

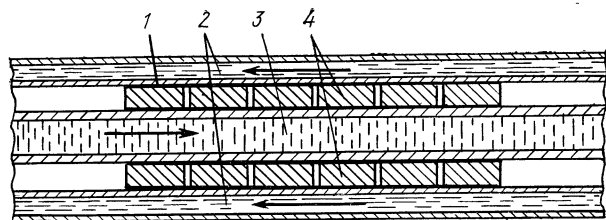


Рис. 8.7. Конструкция узла термогенератора большой мощности:

1 — коммутация термоэлементов; 2 — охлаждающая вода; 3 — теплоноситель; 4 — термоэлементы.

внутренней трубе, а холодные — к наружной трубе. Для снижения вероятности растрескивания из-за термических напряжений термоэлементы были разделены на секции. В качестве термоэлектрического материала использовались сплавы на основе висмута, сурьмы, селена и теллура. Батарея из пяти элементов рассчитана для работы в диапазоне температур $20\text{--}250^{\circ}\text{C}$. Коммутация по горячей стороне производилась припоем из сплава свинца (88 вес. %) и сурьмы. Перед пайкой на поверхность элемента гальваническим путем наносилось никелевое покрытие с целью предотвратить взаимодействие припоя с термоэлектрическим материалом. Для коммутации по холодной стороне использовался эвтектический сплав галлий — индий (25 вес. %). Измерение контактных сопротивлений дало следующие результаты: элемент p -типа на горячей стороне имел сопротивление 90 мком/см^2 , на холодной — 150 мком/см^2 ; элемент n -типа на горячей стороне имел 152 мком/см^2 , на холодной — 63 мком/см^2 . Внутренние и внешние трубы этой батареи были изготовлены из нержавеющей стали, имеющей коэффициент расширения, близкий к термоэлектрическому материалу.

Наиболее подходящий теплоноситель для генератора большой мощности — насыщенный пар, который может обеспечить равномерный нагрев термоэлементов по всей длине трубы и передать значительные тепловые потоки. Для получения пара с температурой

250°C необходимо давление 42 атм и, следовательно, трубопроводы и вся система должны быть рассчитаны на это давление. Для упрощения конструкции испытательного стенда вместо пара была использована смесь окиси дифенила с дифенилом, имеющая температуру кипения 257°C и замерзания 12°C . Удельная теплоемкость этой смеси при температуре кипения равна $2500\text{ Дж/(кг}\cdot\text{град)}$, а плотность — $0,86\text{ г/см}^3$.

Батарея испытывалась в течение 1000 ч при удельном тепловом потоке 9 Вт/см^2 , были получены следующие результаты:

Нагрузка (сопротивление), 10^{-3} ом	0,47	0,97	1,50	2,0
Внутреннее сопротивление батареи, 10^{-3} ом	1,62	1,6	1,6	1,64
ТЭДС, в	0,273	0,280	0,269	0,28
Напряжение, в	0,07	0,11	0,12	0,15
Ток, а	163	117	85,5	75
Мощность, вт	12,6	13,2	9,6	11,0
К. п. д., %	1,88	2,14	1,6	1,8

Полученные результаты довольно стабильны. Низкое значение к. п. д. авторы объясняют большим сопротивлением контактов и значительным падением температуры на стенках труб из нержавеющей стали (теплопроводность при 30°C $0,16\text{ Вт/(см}\cdot\text{град)}$, а при 300°C $0,19\text{ Вт/(см}\cdot\text{град)}$). Исходя из среднего значения ТЭДС $180\text{ мкВ/}^{\circ}\text{C}$ перепад температуры на термоэлементе был не более 150°C . Замена нержавеющей стали медью и более тщательное выполнение контактных соединений может дать увеличение к. п. д. такой батареи до 5%.

§ 8.3.

Реакторные термогенераторы космического назначения

В в е д е н и е. Растущий объем исследований космического пространства требует разработки более мощных источников энергии с длительным сроком службы. Для освоения околоземного пространства с помощью искусственных спутников Земли необходимы энергетические установки мощностью от нескольких ватт до нескольких киловатт. Разрабатываемые проекты обслуживаемых орбитальных станций предусматривают источники энергии мощностью в десятки киловатт со сроком службы несколько лет. Дальнейшее использование полярных спутников связи для трансляции широкоэвещательных теле- и радиопрограмм по нескольким каналам приводит к необходимости разработки энергетических установок мощностью в сотни киловатт. По-видимому, в ближайшем будущем потребуются установки мощностью в тысячи и десятки тысяч киловатт с длительным сроком службы для создания пилотируемых межпланетных кораблей, обитаемых баз на Луне и других целей. Решение этих задач возможно при использовании ядерных источников энергии, обладаю-

щих большой энергоемкостью и надежностью, способных работать в условиях космоса (высокий вакуум, невесомость, сброс тепла излучением и т. п.). Ниже приведено описание некоторых из этих установок.

Установка «Ромашка». Высокотемпературный реактор-преобразователь «Ромашка» электрической мощностью 500 *вт* разработан Институтом атомной энергии имени И. В. Курчатова

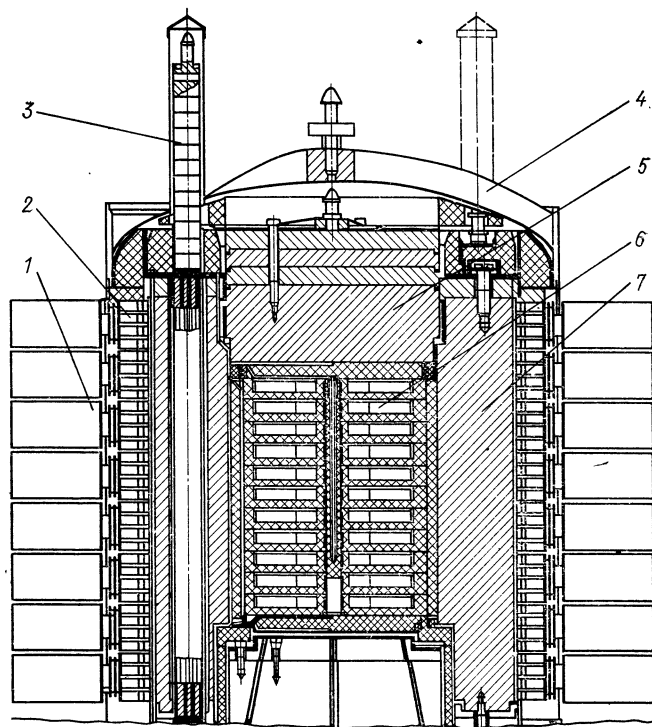


Рис. 8.8. Вертикальный разрез установки «Ромашка»: 1 — ребра излучателя; 2 — термоэлементы; 3 — регулирующий стержень; 4 — корпус установки; 5 — верхний отражатель; 6 — активная зона; 7 — боковой отражатель.

с участием Сухумского физико-технического института, Харьковского физико-технического института и других организаций страны. Установка представляет собой экспериментальный образец, предназначенный для демонстрации возможности совместной работы энергетического реактора и термоэлектрического преобразователя.

На рис. 8.8 показан вертикальный разрез установки «Ромашка», которая включает реакторный источник тепла, термоэлектрический преобразователь и систему сброса тепла, излучением. Тепло, генерируемое в активной зоне реактора, передается посредством теплопро-

водности материалов термоэлектрическому генератору и ребрам излучателя, а затем сбрасывается на охлаждаемую водой стенку вакуумной камеры. Основные характеристики установки:

Электрическая мощность, <i>квт</i>	0,5—0,8*
Тепловая мощность, <i>квт</i>	40
К. п. д., %	1,25—2
Топливо	UC ₂
Загрузка урана-235 (90% обогащение), <i>кг</i>	49
Отражатель	Бериллий + графит
Термоэлектрический материал	SiGe
Срок службы, <i>ч</i>	15 000
Год пуска	1964

* Мощность зависит от температуры холодных спаев термоэлементов.

Конструкция высокотемпературного реактора на быстрых нейтронах разработана Н. Н. Пономаревым-Степным, В. А. Усовым, В. И. Меркиным и др. [14]. Активная зона реактора цилиндрической формы, содержит 11 твэлов. Твэл в форме диска из дикарбида помещается в графитовую кассету. Для снижения возможности растрескивания в результате термических напряжений топливный диск

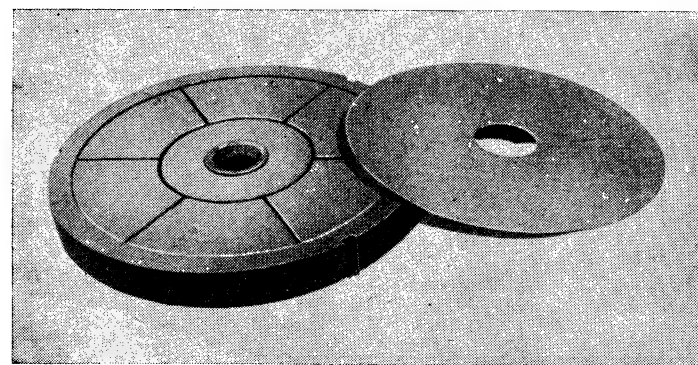


Рис. 8.9. Общий вид твэла установки «Ромашка».

разделен на несколько сегментов. Графитовая кассета используется для увеличения отвода тепла из активной зоны, а также препятствует изменению геометрии топлива в случае его растрескивания или расплавления при отклонении мощности реактора от нормальных условий. Общий вид твэла показан на рис. 8.9. При выборе материала топлива исследовались монокарбид и дикарбид урана, физико-химические свойства которых приведены в табл. 8.5 [15].

Как видно из таблицы, оба материала имеют высокую температуру плавления и содержат более 90 вес. % урана. Однако предпоч-

Таблица 8.5

Характеристика топлива		
Характеристика	UC	UC ₂
Точка плавления, °C	2350—2400	2450—2500
Плотность, г/см ³	13,6	11,68
Коэффициент теплопроводности при 400—1000° C, $\text{вт}/(\text{м} \times \text{град})$	—	16—19
Содержание урана, вес. %	95,2	90,8
То же, г/см ³	12,97	10,6
Коэффициент температурного расширения в диапазоне температур 20—235° C	—	$12,5 \cdot 10^{-6}$
Химическая активность	Разлагается в воде при 80° C	Разлагается в воде при 80° C

тение было отдано дикарбиду урана, поскольку он обладает лучшей совместимостью с графитом при высоких температурах. В связи с этим проведен значительный объем работ по изучению поведения дикарида урана в условиях эксплуатации установки «Ромашка»,

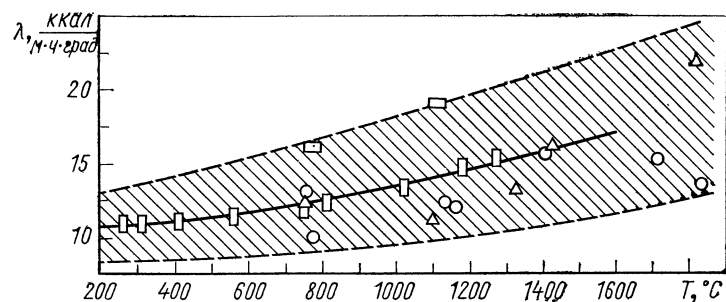


Рис. 8.10. Зависимость теплопроводности дикарида урана от температуры.

включая испаряемость UC₂ в инертной среде и зависимость его теплопроводности от температуры. На рис. 8.10 показана зависимость теплопроводности от температуры (заштрихованная зона определяет разброс результатов измерений). Результаты этих исследований показали возможность использования дикарида урана для твэлов установки «Ромашка».

Радиальный отражатель состоит из внутреннего графитового цилиндра и внешнего цилиндра из металлического бериллия (рис. 8.11). Торцевые отражатели изготовлены также из бериллия. Выбор бериллия в качестве материала отражателя определился

в основном его хорошими ядерно-физическими характеристиками и относительно высокой температурой плавления:

Температура плавления, °C	1285
Температура кипения °C	2970
Плотность, г/см ³ :	
при 25° C	1,84
при 1000° C	1,75
Удельная теплоемкость при 800—900° C, кал/(г·град)	0,73—0,75
Коэффициент теплопроводности при 20° C, $\text{вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$	160
Коэффициент термического расширения при 20—700° C	$16,8 \cdot 10^{-6}$

Металлический бериллий при высоких температурах взаимодействует с графитом, образуя Be₂C. Это обстоятельство потребовало нанесения защитного покрытия на поверхность графитового цилиндра, а также на специальные графитовые пластины, расположенные с внешней стороны радиального отражателя. Эти пластины предот-

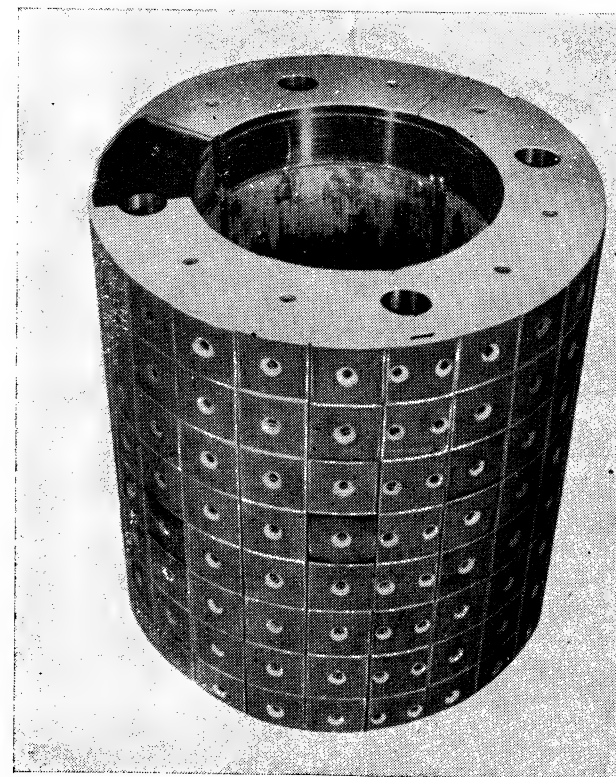


Рис. 8.11. Радиальный отражатель реактора.

вращают деформацию отражателя при рабочей температуре под действием плотно прижатых термоэлементов.

Система регулирования мощности реактора состоит из четырех стержней, расположенных в радиальном отражателе, и нижнего подвижного отражателя. Один из стержней, состоящий из бериллия и окиси бериллия в оболочке из нержавеющей стали, используется для автоматического регулирования, его эффективность составляет 0,2%. Ручное регулирование осуществляется другим стержнем эффективностью 0,4%, который содержит рассеивающую секцию из бериллия и окиси бериллия и поглощающую секцию из борсодержащего сплава. Остальные два стержня эффективностью 0,4% и торцевой отражатель используются для аварийной защиты. Торцевой отражатель используется также для компенсации температурного эффекта. Механизмы привода органов регулирования и защиты расположены снизу, под корпусом реактора, и приводятся в действие с помощью гидравлической системы, кроме стержня автоматического регулирования, который перемещается сервоприводом с электрическим питанием.

Ниже приведены нейтронно-физические характеристики активной зоны реактора.

Поток быстрых нейтронов в центре реактора, нейтрон/(см ² ·сек)	10 ¹³
Утечка нейтронов из реактора, нейтрон/(см ² ·сек)	3·10 ¹¹
Количество регулирующих стержней, шт.	4
Эффективности регулирующих стержней, %	1,4
Эффективность торцевого подвижного отражателя, %	3,5
Температура в центре реактора, °С	1800—1900
Температура бериллиевого отражателя, °С:	
внутренняя поверхность	1200
внешняя поверхность	1000

Для определения нейтроннофизических характеристик реактора использовался многогрупповой метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Это позволило с достаточной точностью учесть геометрические и физические особенности реактора, обусловленные наличием каналов и зазоров сложной формы, неоднородность материалов активной зоны и отражателя, свойства системы регулирования и др. Расчеты проводились с использованием электронно-вычислительной машины и 21-групповой системы констант, учитывающей резонансный характер сечений урана-238, наличие реакций (n , $2n$) в бериллии и другие факторы. В процессе расчетов прослеживалось около 50 000 нейтронных «историй».

Термоэлектрический преобразователь установки «Ромашка», разработанный И. Г. Гвердцители, Ю. Д. Губановым, С. П. Лалыкиным и др. [14], состоит из нескольких тысяч термоэлементов, смонтированных на цилиндрическом стальном корпусе. Коммутация тер-

моэлементов в электрическую цепь осуществляется по холодной стороне. Для обеспечения плотного контакта горячих спаев элементов с радиальным отражателем при различных изменениях температурного режима реактора использовались специальные сильфоны, заполняемые инертным газом.

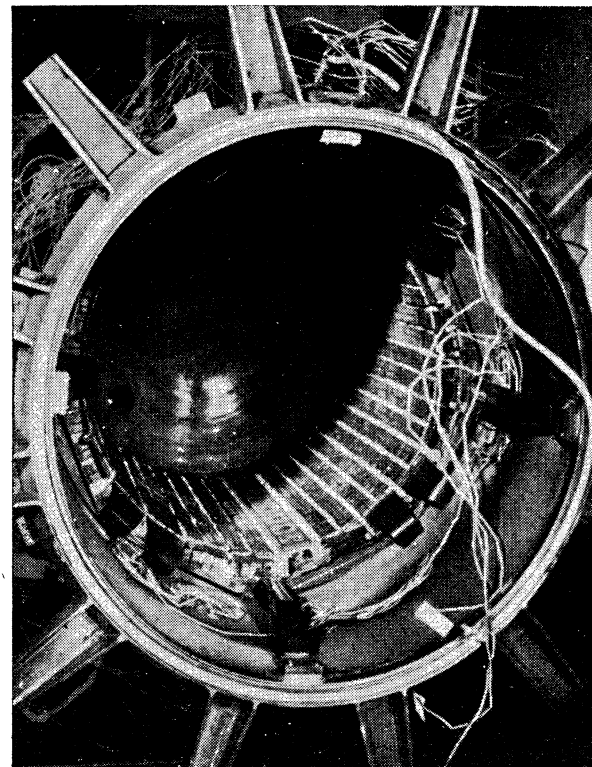


Рис. 8.12. Общий вид преобразователя установки «Ромашка».

Преобразователь разделен на четыре группы, имеющие независимые выводы, что позволяет исследовать характеристики как отдельных групп термоэлементов, так и преобразователя в целом при последовательном и параллельном соединениях групп. Внутри каждой группы элементы коммутируются последовательно в четыре параллельные цепи, чтобы исключить возможность потери выходной мощности из-за образования трещин в термоэлектрическом материале или коммутации. Для снижения тепловых потерь зазоры между элементами заполнены теплоизоляционным материалом. Общий вид преобразователя показан на рис. 8.12.

В качестве термоэлектрического материала использован кремний-германиевый сплав с 15%-ным содержанием германия. Этот материал характеризуется высокой рабочей температурой (1000°C), низким давлением паров, хорошей прочностью, стабильностью термоэлектрических свойств при рабочих температурах (см. гл. 4).

В процессе разработки преобразователя было проведено большое количество исследований работоспособности термоэлементов в потоках нейтронов и γ -излучения. На рис. 8.13 приведены кривые, полученные Г. М. Павловым при испытании термоэлементов в петле

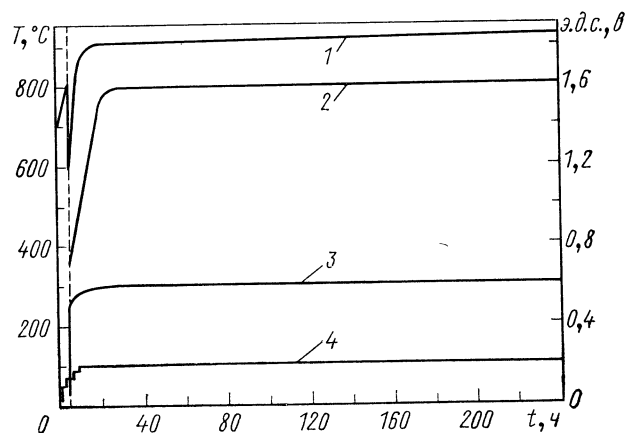


Рис. 8.13. Изменение основных параметров кремний-германиевых термоэлементов при облучении в реакторе (интегральный поток $3 \cdot 10^{19}$ нейтрон/см²):

1 — температура горячего слоя; 2 — ТЭДС секции; 3 — перепад температуры на термоэлементах; 4 — мощность реактора.

реактора при интегральном потоке тепловых нейтронов $3 \cdot 10^{19}$ нейтрон/см² [14]. Как видно из рис. 8.13, под действием реакторных излучений основные свойства кремний-германиевых элементов изменяются довольно слабо. Последующая эксплуатация установки «Ромашка» подтвердила этот вывод.

Стендовые испытания узлов установки. Нейтроннофизические характеристики активной зоны реактора изучались на специальном физическом стенде с использованием пяти различных критических сборок, отличающихся концентрацией делящегося материала. Для каждой критической сборки определялись зависимость критической массы от состава активной зоны, эффективность торцевого отражателя и стержня регулирования, распределение энерговыделения в активной зоне, влияние на реактивность конструктивных зазоров и другие вопросы. На рис. 8.14 показано распределение энерговыделения по радиусу и высоте активной зоны, полученное А. М. Крутовым [14].

При исследовании влияния перемещений подвижного отражателя и стержней регулирования на нейтронно-физические характеристики и температурные поля реактивности измерялась с помощью импульсного и интегрального методов, а также по периоду разгона реактора. Сравнение результатов измерений реактивности, полученных различными методами, позволило установить, что в подобного типа реакторах практически отсутствуют запаздывающие фото-нейтроны, обусловленные наличием бериллиевого отражателя. Поэтому при обработке экспериментальных данных использовались характеристики шести групп запаздывающих нейтронов.

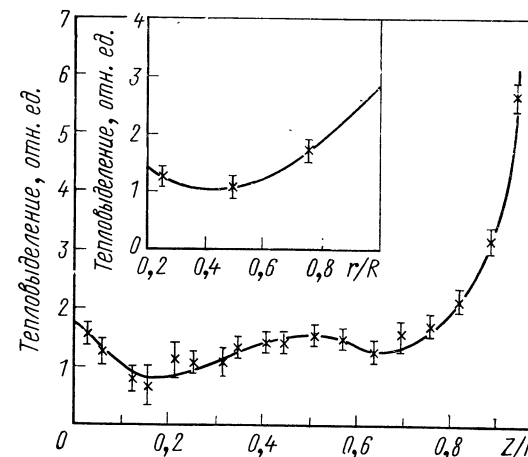


Рис. 8.14. Распределение тепловыделения по высоте и радиусу активной зоны (R и H — радиус и высота активной зоны; r и z — координаты).

Значительное внимание было уделено ресурсным испытаниям термоэлементов и всего преобразователя в сборе на стендах с электрическим подогревом. С целью проверки работоспособности установки в целом и отдельных ее узлов, а также исследования рабочих параметров в стационарных и переходных режимах, были проведены комплексные 1000-часовые испытания полномасштабной тепловой модели реактора-преобразователя на стенде с электроподогревом. На рис. 8.15 показана модель установки после испытаний. При этих испытаниях измерялись температурные поля в различных элементах установки с помощью большого количества различных термодатчиков. Замер электрических характеристик преобразователя производился со специального пульта. С помощью этого пульта можно было производить измерения по каждой группе термоэлементов, а также при параллельном и последовательном соединениях групп. Электрическая мощность преобразователя определялась в режиме максимальной мощности. Измерения ТЭДС, тока и других харак-

теристик производились при изменении нагрузки от 0,1 до 10 ом. Указанные характеристики во время испытаний практически не изменялись, только к концу было замечено некоторое увеличение внутреннего сопротивления преобразователя, в связи с чем электрическая мощность уменьшилась примерно на 10%. Результаты испы-

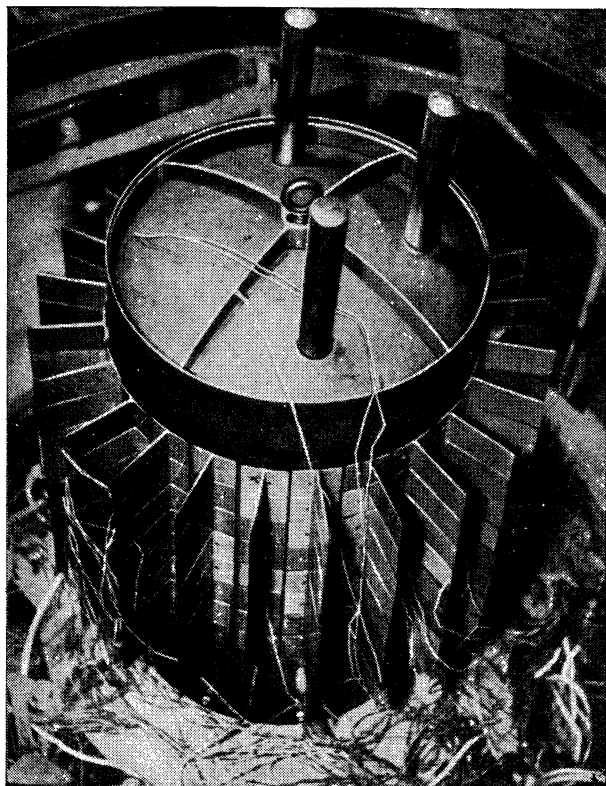


Рис. 8.15. Общий вид тепловой модели установки «Ромашка» после испытаний.

таний показали удовлетворительную работоспособность узлов установки и позволили приступить к испытаниям на натурном стенде с ядерным реактором.

Эксплуатационные испытания. Установка была выведена на режим оптимальной нагрузки при температуре в центре активной зоны 1800°C и температуре внешней поверхности отражателя около 1000°C . Электрический ток полезной нагрузки достигал 88 а. Тепловая мощность и температурный режим реактора и преобразователя с хорошей точностью поддерживались на заданном уровне посредст-

вом саморегулирования реактора, имеющего отрицательный температурный коэффициент реактивности.

Установка «Ромашка» проработала непрерывно с августа 1964 г. по апрель 1966 г. с незначительным изменением электрической мощности к концу этого периода. Опыт работы установки продемонстрировал работоспособность кремний-германиевого сплава в поле излучений реактора на быстрых нейтронах. Испытания установки показали также стабильность работы реактора на быстрых нейтронах и его саморегулируемость. Имевшийся автоматический регулятор реактора практически не использовался, если не считать компенсации потерь реактивности вследствие выгорания ядерного топлива.

Результаты испытаний установки «Ромашка» имеют важное значение для разработки более мощных реакторных термогенераторов применительно к космическим задачам. Установки такого типа могут найти применение и в наземных условиях, где требуется высокая надежность и длительный срок службы, а также в случаях, когда использование парогенераторов и турбин затруднительно.

Данные первого периода эксплуатации установки «Ромашка» были доложены Н. Н. Пономаревым-Степным на III Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, сентябрь 1964 г.). На конференции были также показаны макет и цветной кинофильм, демонстрировавший основные этапы работ по сооружению этой уникальной установки. Сообщение о первом в мире реакторе-преобразователе на быстрых нейтронах с самой высокой температурой в активной зоне было встречено на конференции с большим интересом. Во время эксплуатации установки ее посетило большое число советских и иностранных ученых.

Установка СНАП-10 (США). Термогенератор СНАП-10 представляет собой ядерную энергетическую установку малой мощности, предназначенную для использования в качестве источника энергопитания бортовой аппаратуры космических кораблей. Система состоит из реактора на тепловых нейтронах, термоэлектрического преобразователя и излучателя. Невысокая тепловая мощность позволяет

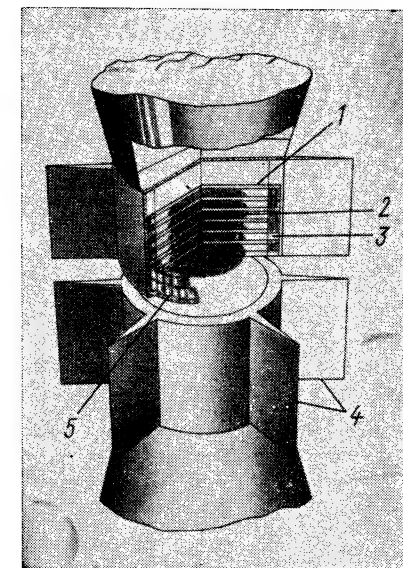


Рис. 8.16. Установка СНАП-10:

1 — топливные пластины; 2 — бериллиевые пластины; 3 — бериллиевый отражатель; 4 — ребра излучателя; 5 — термоэлектрический преобразователь.

осуществить передачу тепла от реактора к термоэлектрическому преобразователю и далее к излучателю посредством теплопроводности так же, как в описанной выше установке «Ромашка». Общий вид термогенератора СНАП-10 показан на рис. 8.16, а основные характеристики приведены ниже [16]:

Электрическая мощность, <i>вт</i>	250—300
Тепловая мощность, <i>квт</i>	15
К. п. д., %	1,66
Топливо	Сплав ^{235}U с гидридом циркония
Отражатель	Бериллий
Диаметр реактора, <i>мм</i>	305
Высота реактора, <i>мм</i>	457
Вес реактора, <i>кг</i>	70—90
Термогенератор:	
материал <i>p</i> -типа	GeBiTe
материал <i>n</i> -типа	PbTe
температура горячего спая, $^{\circ}\text{C}$	538
температура холодного спая, $^{\circ}\text{C}$	344
число термоэлементов, шт.	768
Расчетный вес установки с защитой, <i>кг*</i>	272

* Вес защиты определен на основании дозы 10^{12} нейтрон/см² и 10^7 рад, получаемой аппаратурой в течение года.

Активная зона реактора СНАП-10 состоит из твэлов цилиндрической формы, содержащих уран-235 и гидрид циркония (последний используется в качестве замедлителя). Между твэлами помещаются диски из бериллия, которые улучшают отвод тепла из активной зоны. С торцов и периферии активная зона окружена бериллиевым отражателем. К боковому отражателю примыкает термоэлектрический генератор, от которого отвод тепла осуществляется с помощью излучателя. Реактор состоит из двух половин, в каждую из которых загружается топливо с массой ниже критической. Эти половины во время транспортировки отделяются друг от друга специальным устройством, которое удаляется непосредственно перед запуском установки в космос. Реактор включается после вывода его на расчетную орбиту. При этом по команде с Земли включается механизм, сближающий обе половины реактора, в результате чего загрузка топлива становится выше критической и создаются условия для цепной реакции деления. После достижения рабочего уровня мощности реактор переключается на саморегулирование вследствие отрицательного температурного коэффициента. Система рассчитана на непрерывную работу в режиме саморегулирования в течение года и более.

Температурный режим установки обусловлен в основном требованиями надежности эксплуатации термоэлементов и их рабочими характеристиками. В качестве материала *p*-ветви выбран тройной сплав на основе германия, висмута и теллура, а для *n*-ветви — теллурид свинца. Для коммутации по горячей стороне использовались

железные пластины, к холодным концам термостолбиков припаивались гибкие пружины и коммутация осуществлялась с помощью медных пластин, припаянных к холодным концам пружин. Эти пружины обеспечивали надежные тепловые контакты по горячей стороне, допускали относительные перемещения горячего и холодного концов термоэлемента без значительных изгибающих моментов в термоэлектрическом материале, отводили тепло от термогенератора к излучателю и обеспечивали электрическое соединение термостолбиков. Корпус преобразователя, состоящий из двух половин, изготовлен из нержавеющей стали. На каждой половине монтировалось 16 групп по 24 термостолбика в группе. Термостолбики электрически изолировались от корпуса, между ними размещалась тепловая изоляция для снижения потерь тепла. Излучатель имел клиновидные ребра, покрытые материалом с высокой излучательной способностью (0,8—0,9) в инфракрасной области и низкой поглощающей способностью (0,1—0,3) в видимой части спектра. Последнее обстоятельство особенно важно при температурах излучателя ниже 370°C .

Вес излучателя сильно зависит от температуры холодного спая. Например, при уменьшении температуры холодного спая с 393 до 338°C вес ребер охлаждения генератора возрастает с 54 до 150 кг [17]. Работы по проекту СНАП-10 были прекращены на стадии испытания отдельных узлов, дальнейшие усилия были направлены на разработку проекта СНАП-10А.

Установка СНАП-10А. Термогенератор СНАП-10А электрической мощностью 500 вт разработан и изготовлен в США фирмой «Атомик интернейшнл» для использования в качестве источника питания бортовой аппаратуры метеорологических и навигационных спутников, спутников связи и других космических объектов. Установка состоит из ядерного реактора, термоэлектрического преобразователя, излучателя и жидкометаллического контура с электромагнитным насосом. Схема установки СНАП-10А показана на рис. 8.17. Основные характеристики [18]:

Электрическая мощность, <i>вт</i>	500*
Тепловая мощность, <i>квт</i>	34
К. п. д., %	1,47
Загрузка урана-235, <i>кг</i>	4,8
Теплоноситель	NaK-78
Температура теплоносителя на входе, $^{\circ}\text{C}$	472
Температура теплоносителя на выходе, $^{\circ}\text{C}$	560
Высота установки, <i>см</i>	347
Диаметр основания, <i>см</i>	132
Вес установки, <i>кг</i>	435
Расчетный срок службы, годы	1
Ориентировочная стоимость, долл.	10^6

* Проектная мощность 540 вт.

В качестве источника тепла был выбран реактор на эпитепловых нейтронах с замедлителем из гидрида циркония. Активная зона высотой 31 см и диаметром 22 см содержала 37 элементов, собранных в гексагональную решетку. Элементы изготовлены из материала, со-

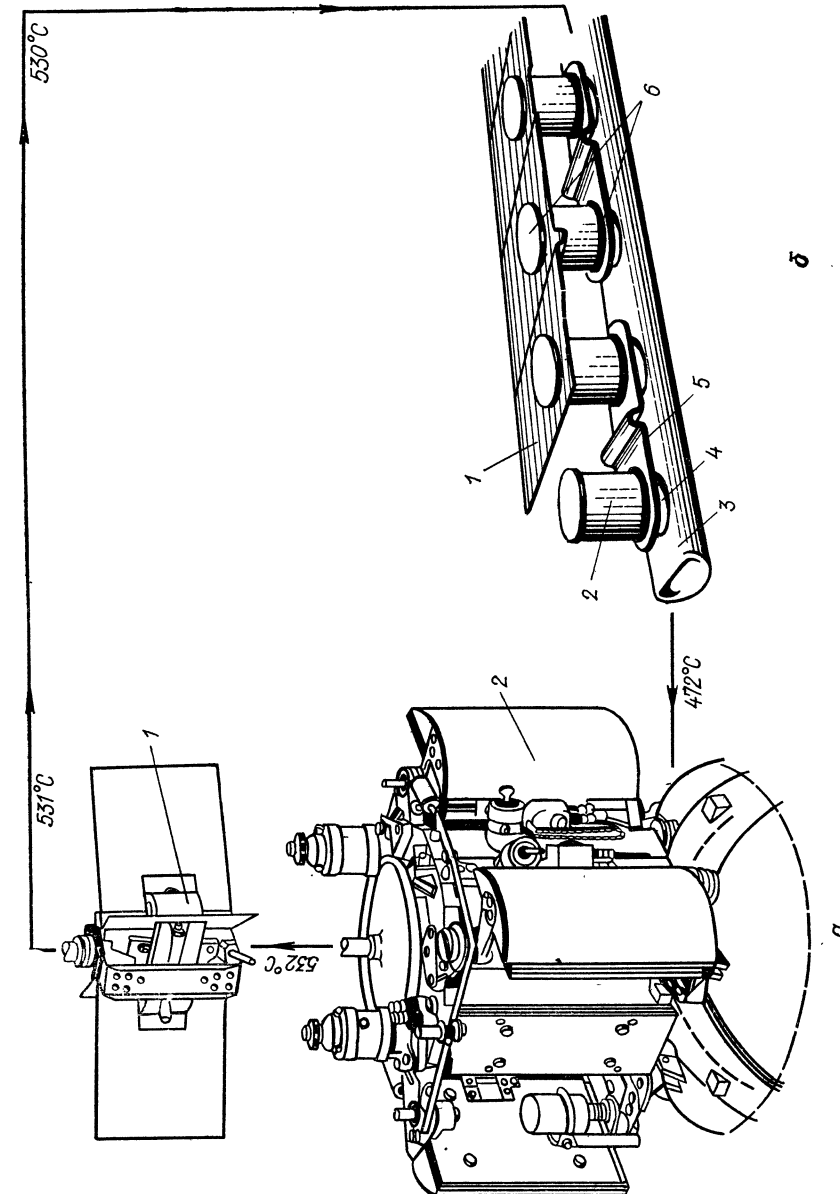


Рис. 8.17.
 Схема установки
 СНАП-10А
 (а) и модуль термического преобразователя (б):
 а: 1 — термоэлектрический элемент; 2 — реактор; 3 — трубка с теплоносителем; 4 — изолятор; 5 — коммутационная пластина; 6 — вольфрамовые шайбы

державшего 10 вес. % высокообогащенного урана в циркониевой матрице. Этот материал подвергался гидрированию до концентрации водорода $6,35 \cdot 10^{22}$ атом/см³. Элементы заключались в оболочку из хастеллоя-N толщиной 0,38 мм. Внутренняя поверхность оболочки покрывалась слоем керамики, используемой как барьер, препятствующий выделению водорода при высоких температурах. В качестве выгорающего поглотителя применялась окись самария, диспергированная в слое керамики [19].

Использование таких элементов системы топливо — замедлитель приводит к следующим потерям реактивности: а) кратковременный эффект, вызываемый перераспределением водорода в результате его миграции от горячих к холодным участкам материала топлива — замедлитель; б) утечка водорода через керамический барьер и оболочку топлива в систему теплоносителя и затем в космическое пространство.

Активная зона заключена в корпус из нержавеющей стали и окружена радиальным бериллиевым отражателем толщиной около 5 см. Для регулирования реактора используются четыре полукруглые бериллиевые секции, расположенные в радиальном отражателе. Поворот этих секций вокруг вертикальной оси изменяет их положение по отношению к активной зоне и увеличивает или уменьшает утечку нейтронов из реактора. Во избежание самопроизвольного пуска реактора положение секций фиксируется стопорной чекой. Перед запуском установки на орбиту по команде с Земли чека разрывается, регулирующие секции поворачиваются на определенный угол и создают дополнительную реактивность. Две секции поворачиваются с большей скоростью с помощью пружин, две другие вращаются под действием электромоторов с меньшей скоростью. Указанные секции используются для регулирования в период вывода реактора на рабочую мощность и для компенсации изменений реактивности, вызываемых температурными и мощностными эффектами, накоплением ксенона и частичным перераспределением водорода в первый период работы реактора на полной мощности (72 ч). После этого секции отключаются и дальнейшие потери реактивности, обусловленные утечкой водорода, выгоранием топлива и накоплением продуктов деления, компенсируются выгоранием самариевого поглотителя.

Сборка радиального отражателя вместе с соответствующими регулируемыми секциями разделена на две части, что позволяет отделять отражатель от корпуса активной зоны, не нарушая его целостности и герметичности контура жидкометаллического теплоносителя. В качестве теплоносителя используется эвтектика NaK-78, проходящая через активную зону в промежутках между элементами топлива — замедлителем. Основные характеристики реактора СНАП-10А:

Средний интегральный поток нейтронов, нейтрон/см ² .	$1,7 \cdot 10^{11}$
Объем активной зоны, м ³	$8,5 \cdot 10^{-3}$

Шаг решетки, см	3,2
Диаметр корпуса реактора, см	22,7
Высота корпуса реактора, см	39,6
Максимальная температура топлива, °С	585
Расход теплоносителя, л/сек	0,83
Среднее энерговыделение, кВт/л	4
Средний тепловой поток, Вт/м ²	32,5·10 ³

Проверка физических принципов выбранной конструкции реактора была проведена на критической сборке. Активная зона состояла из спрессованной в холодном состоянии порошкообразной смеси двуокиси урана и гидрида циркония, содержащей 10 вес. % урана-235. Кроме критических опытов, на установке получена информация об эффективности отражателя и возможности управления мощностью реактора, изменением геометрии отражателя.

Следующим этапом исследований было получение необходимых уровней мощности, температуры и срока службы реактора выбранной конструкции, в частности, проверка способности оболочек элементов системы топливо — замедлитель удерживать водород при заданных уровнях температуры и излучения. С этой целью в 1959—1960 гг. был изготовлен и испытан экспериментальный реактор, включающий все основные узлы реактора СНАП-10А. Активная зона состояла из 61 топливного элемента диаметром 2,54 см, набранных в треугольную решетку и заключенных в корпус диаметром 22,9 см. Элементы содержали 7 вес. % урана-235, концентрация водорода в гидриде циркония составляла $6 \cdot 10^{22}$ атом/см³. Реактор охлаждался потоком NaK-78.

Общая длительность испытаний этой установки составила 6035 ч, в том числе 1900 ч реактор работал при температуре теплоносителя на выходе 650° С и 3300 ч при температуре 480° С. Третья стадия испытаний заключалась в проверке усовершенствованной конструкции, которая по своим характеристикам более соответствовала условиям работы в космическом пространстве. Испытания второго экспериментального реактора проводились с апреля 1961 г. по декабрь 1962 г. Активная зона реактора состояла из 37 элементов диаметром 3,2 см, содержащих 10% урана-235 и водорода $6,5 \cdot 10^{22}$ атом/см³. Бериллиевый отражатель толщиной 7,6 см был разделен на две откидывающиеся секции и имел две поворачивающиеся полуцилиндрические секции для регулирования. Реактор работал 6900 ч при температуре теплоносителя на выходе 480° С и более 2100 ч при 650° С.

Термоэлектрический преобразователь установки СНАП-10А состоит из 2880 термостолбиков. Поток теплоносителя проходит через 40 D-образных трубок из нержавеющей стали, расположенных вдоль образующих конструкций излучателя конической формы. Каждая трубка последовательно соединяет три термоэлектрических модуля мощностью 4—6 Вт каждый. Устройство модуля показано на рис. 8.17. Преобразователь состоит из 120 таких модулей. Вдоль каждой трубки располагается 72 термостолбика цилиндрической формы из кремний-германиевого сплава *n*- и *p*-типа. Термостолбики

электрически изолированы от трубки с теплоносителем тонкими дисками из окиси алюминия и последовательно соединены медными шинами по горячей стороне. По холодной стороне элементы соединены алюминиевыми пластинами размером 8×5 см, образующими излучатель. Каждая пластина излучателя электрически отделена от соседних пластин зазором шириной 1 мм.

Чтобы исключить возможность потери выходной мощности генератора из-за образования трещин в термостолбиках или коммутации, использовано параллельно-последовательное соединение элементов. Такая коммутация обеспечивает 99% вероятности исправного действия преобразователя после запуска ракеты.

Вся система термоэлектрического преобразователя монтируется на внешней поверхности каркаса конической формы, изготовленного из гофрированного титана толщиной 0,5 мм, с кольцевыми ребрами жесткости.

В процессе разработки изготовлено и испытано девять полностью собранных преобразователей. При этом основные усилия были направлены на уменьшение электрических потерь, повышение срока службы и надежности преобразователя (за счет использования паяных контактов). Термоэлектрические модули, состоящие из 22 элементов, испытывались при температуре горячего спая 704° С и температуре холодного спая 482° С в условиях, близких к условиям космического пространства, в течение 23 000 ч. При этом 18 серийных модулей были подвергнуты испытаниям в условиях, близких к эксплуатационным, 14 модулей испытывались на механическое разрушение, а 18 модулей — на ускоренное старение при повышенных температурах. Результаты этих испытаний показали, что термоэлектрический преобразователь может надежно работать в условиях космического пространства и давать 500 Вт электрической мощности. Основные характеристики:

Электрическая мощность, Вт	500
Тепло, проходящее через преобразователь, кВт	30
Рабочее напряжение, В	28,5
Рабочий ток, А	19
Средняя температура теплоносителя, °С	502
Средняя температура горячего спая, °С	485
Средняя температура излучателя, °С	315
Перепад температуры на материале, °С	170
Сопротивление термоэлектрического материала, Ом	1,4
Число термостолбиков, шт.	2880
Диаметр термостолбиков, мм	12,7
Длина термостолбиков, мм	10
Добротность материала, (град) ⁻¹	0,58·10 ⁻³
Общий к. п. д. преобразователя, %	1,6

Насос. Реакторный источник тепла и преобразователь термодинамически связаны между собой натрий-калиевым контуром. Циркуляция теплоносителя осуществляется термоэлектрическим электромагнитным насосом кондукционного типа, не имеющим движущихся

частей. Устройство насоса показано на рис. 8.18. Насос состоит из канала, по которому циркулирует теплоноситель, двух электродов и постоянного магнита, создающего магнитное поле 2400 гс. Поле направлено перпендикулярно электрическому току, проходящему через теплоноситель в канале. Термоэлементы из теллурида свинца горячими спаями прижимаются к электродам, а холодными — к алюминиевым пластинам излучателя. Тепло, поступающее от теплоносителя, проходит через термоэлементы и сбрасывается в космос излучением (700 *вт*). При этом перепад температур на термоэлементах составляет 150° С. Насос расположен в верхней части реактора,

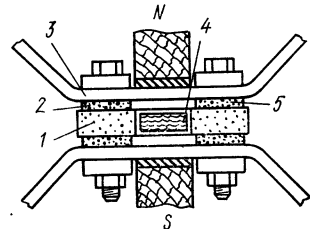


Рис. 8.18. Термоэлектрический электромагнитный насос:

1 — электрод; 2 — n-ветвь; 3 — излучатель; 4 — теплоноситель; 5 — p-ветвь.

мощность на прокачку, создаваемая этим насосом, составляет 5 *вт*. При расходе жидкого металла 0,8 л/сек насос обеспечивает напор 0,7 атм. К. п. д. насоса, определенный как отношение мощности на прокачку к потребляемой тепловой мощности, составляет 1%. Для обеспечения работы насоса на малой мощности и при низких температурах (пусковой период) используется химическая батарея. Термоэлементы изготавливались следующим способом: слой порошка теллурида свинца помещался между двумя слоями порошка железа, затем все это прессовалось при комнатной температуре и спекалось при 700° С. Порошкообразное железо использовалось в качестве контактного материала. Спрессованные таким способом порошки обеспечивали хороший контакт между железом и теллуридом свинца и снижали термические напряжения в термостолбиках. Боковые поверхности элементов покрывались керамическим материалом с целью предотвращения их быстрого износа. Модели такого насоса проработали в течение 13 500 ч в вакууме при температуре NaK выше 540° С [20].

В герметическом жидкометаллическом контуре установки помимо насоса имелось сильфонное устройство, обеспечивающее компенсацию термических расширений теплоносителя и узлов контура и поддерживающее давление в контуре выше предела образования пузырьков пара в насосе. Контур теплоносителя изготовлен из нержавеющей стали 316 и 405. В ходе ресурсных испытаний термоэлектрические насосы проработали более 14 000 ч. Расширительные компенсаторы испытывались в контуре с теплоносителем более 5000 ч. Все контрольно-измерительные приборы прошли испытания в условиях, близких к эксплуатационным. Полученные результаты показали, что основные трудности связаны с поведением материалов и способами сборки узлов.

Защита. Между реактором и термоэлектрическим преобразователем помещена защита, рассчитанная на ослабление уровня излучения реактора до $5 \cdot 10^{13}$ нейтрон/(см²·год) по быстрым нейтронам

и 10^7 р/год и по γ -лучам. Указанные уровни радиации определяются требованиями полупроводниковой аппаратуры космического корабля. Трудной проблемой оказалась разработка защиты нейтронов, рассеиваемых элементами конструкций корабля. Эта задача решена размещением полезного груза внутри конуса теневой защиты. В связи с этим была выбрана коническая конфигурация каркаса излучателя, диаметр основания которого определился габаритными размерами полезного груза, верхний диаметр — размерами реактора, а высота — площадью излучателя.

Защита от излучения составлена из пластин гидрида лития, заключенных в общую тонкую стальную оболочку, которая предотвращает утечку водорода в космическое пространство. Вес защиты 98 кг, последняя ослабляет поток быстрых нейтронов на 4—5 порядков. Вес основных узлов системы:

Основные узлы	Вес, кг	Основные узлы	Вес, кг
Реактор	125	Трубопровод	20
Защита	98	Конструкция	38
Преобразователь	70	Испытательное оборудо- вание	48
Насос	9	Тепловой экран	14
Компенсаторы расши- рения	13	Общий вес	435

Генератор СНАП-10А устанавливается в головной части космического корабля «Аджена», на котором размещены системы для дистанционного запуска установки на орбите по команде с Земли, аппаратура для контроля за работой реактора и преобразователя, телеметрическая система и другие устройства. Космический корабль «Аджена» с установкой СНАП-10А выводится на орбиту с помощью ракеты-носителя «Атлас».

Во время запуска ракеты силовая установка закрыта аэродинамическим обтекателем, который удаляется по окончании работы двигателя ракеты. Термоэлектрический преобразователь окружен тепловой защитой, предотвращающей замерзание жидкого металла в контуре до пуска реактора. Эта тепловая защита удаляется в момент включения реактора.

Испытания установки СНАП-10А. Для получения данных о работе установки в эксплуатационных условиях были проведены следующие испытания. Первый опытный образец с электрическим нагревом испытывался в течение 90 суток. Во время этих испытаний имитировались условия космического пространства, ударные нагрузки и вибрации, характерные для запуска ракеты, включение реактора на орбите и ресурсная эксплуатация на полной мощности.

Испытание второго образца с электрическим нагревом по конструкции, аналогичной летному варианту, было проведено в середине 1964 г. В ходе этих испытаний подтвердились результаты, полученные при испытании первого образца, а характеристики некоторых систем оказались даже несколько лучше вследствие усовершенствования их конструкции.

В июне 1964 г. было закончено изготовление, а в августе начаты испытания наземного образца установки с ядерным реактором. При этом имитировались все условия, в которых должна находиться установка, начиная от сборки и кончая работой на орбите. Во время испытаний на ударные нагрузки и вибрацию подавались синусоидальные механические импульсы по каждой из трех осей с частотой 5—20 000 *гц*. Амплитуда колебаний при испытаниях на вибрацию составляла 6,3 *мм*, а перегрузка достигала 7,5 *g*. В ходе испытаний на вибрацию наблюдались деформация подшипников, ослабление неправильно закрепленных соединительных проводников и др. Каких-либо серьезных технических проблем не возникло. После этих испытаний установка была помещена в вакуумную камеру, в которой поддерживалось давление 10^{-3} — 10^{-4} *мм рт. ст.* и температура 26° С. Для поддержания постоянной температуры стенки вакуумной камеры охлаждались водой. В 1964 г. установка была запущена с помощью радиосигнала и выведена на полную мощность. В этом режиме она проработала более года. Результаты испытаний показали, что установка работает очень устойчиво, ухудшение отдельных параметров не превышает расчетных значений, при средней скорости снижения температуры реактора 0,56° С в неделю можно обеспечить электрическую мощность установки 500 *вт* в течение года.

Летные испытания. Сборка всех узлов установки СНАП-10А производилась на заводе-изготовителе, за исключением загрузки топлива в активную зону реактора и заполнения контура теплоносителем. Эти операции осуществлялись во время окончательных приемо-сдаточных испытаний, когда проводилась проверка работы установки при максимальной рабочей температуре (вследствие использования электрических подогревателей), в условиях, близких к условиям космического пространства. Исследование физики реактора проводилось на нулевой мощности как при комнатной, так и при максимальной рабочих температурах.

На стартовую площадку установка СНАП-10А транспортировалась в специальном контейнере с двойными стенками, установленном на автомашине. При этом бериллиевый отражатель был снят во избежание возможности самопроизвольного пуска реактора. После стыковки установки СНАП-10А с космическим аппаратом «Аджена» была проверена работа системы в целом при рабочих температурах, создаваемых электрическими подогревателями. В программу этих испытаний входило ограниченное перемещение управляющих секций реактора, проверка работоспособности всех узлов установки СНАП-10А с использованием каналов управления космического аппарата «Аджена» и последовательной имитацией всех операций, совершаемых при выводе системы на орбиту.

В разрешении на вывод установки СНАП-10А в космос, выданном КЭА США, работа реакторной установки с точки зрения общей безопасности регламентировалась следующим образом: ядерная энергетическая установка не должна включаться в случае пребывания

космического аппарата на орбите менее одного месяца; при продолжительности полета космического аппарата на орбите от одного месяца до 10 лет допускается эксплуатация реактора в течение 5 дней; при существовании космического аппарата на орбите от 10 до 100 лет разрешается эксплуатация ядерной системы в течение 30 дней; наконец, при нахождении космического аппарата на орбите свыше 100 лет допускается неограниченная эксплуатация ядерной системы.

Запуск установки СНАП-10А на орбиту вокруг Земли был осуществлен 3 апреля 1965 г. с базы ВВС США «Ванденберг». Космический аппарат «Аджена» был выведен на орбиту, близкую к расчетной, со следующими параметрами: высота в апогее 1320 *км*, высота в перигее 1290 *км*. Время существования корабля на орбите с такими характеристиками составляет более 3000 лет. Команда с Земли на включение реакторной установки была подана на втором витке, через 3 ч 40 *мин* после пуска ракеты и подтверждения параметров орбиты. Критический параметр установки в предпусковой период — температура теплоносителя, которая не должна быть ниже — 11° С во всем контуре. Для снижения тепловых потерь и равномерного распределения нагрева солнечными лучами жидкометаллический контур был заключен в тепловую защиту. Максимальная температура тепловой защиты достигала 126° С. В предпусковой период поддерживалась циркуляция теплоносителя, чтобы равномерно распределить тепло, поглощенное от солнечных лучей и предотвратить локальные замерзания теплоносителя. Эти меры предосторожности обеспечивали температуру теплоносителя выше 30° С.

Мощность на циркуляцию теплоносителя в предпусковой период подавалась от батареи насоса, которая давала ток 43 *а*. На основе результатов наземных испытаний такая батарея должна была обеспечивать расход NaK около 0,45 *г/мин*. Однако фактический расход в этот период составлял 1,2 *г/мин*. Дополнительная мощность на циркуляцию поступала от термоэлектрического преобразователя насоса. Ребра излучателя насоса охлаждались до 21° С, создавая перепад температуры на термоэлементах около 30° С. Эти данные показывают, что в будущих аналогичных системах необходимость в использовании батареи в предпусковой период, по-видимому, отпадает [21].

В космическом пространстве нейтроны в реакторе до его запуска образуются в результате взаимодействия протонов высоких энергий с бериллиевым отражателем. Предварительные оценки показывали, что мощность этого источника находится в пределах 10^{-5} — 10^{-8} *вт*. Знание указанной величины важно для определения скорости роста реактивности реактора в период увеличения мощности от уровня этого источника до 100 *вт*, когда изменения мощности реактора начинают ограничиваться эффектом обратной тепловой связи. Экспериментальные измерения показали, что мощность такого нейтронного источника составляет 10^{-6} *вт*.

Реактор был выведен на критический режим через 6 ч 10 *мин* после включения, а через 8 ч 40 *мин* достиг проектного уровня мощ-

ности. С целью компенсации кратковременных изменений реактивности в течение первых шести суток работы установки использовалась автоматическая система регулирования реактора. В это время параметры установки были выбраны таким образом, чтобы после 90 дней эксплуатации ее выходная мощность составляла 500 *вт*. В начальный период термоэлектрический преобразователь показал несколько большую мощность, чем во время испытаний в вакуумной камере, имитирующей условия космоса. Это можно объяснить более низкой температурой в космическом пространстве.

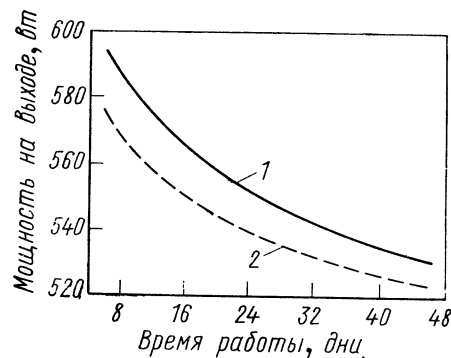


Рис. 8.19. Измеренные (1) и расчетные (2) характеристики летных испытаний установки СНАП-10А.

16 мая 1965 г., через 43 дня непрерывной эксплуатации, наземные станции слежения за полетом перестали получать телеметрические сигналы от космического аппарата. Спустя двое суток телеметрическая система космического аппарата неожиданно снова начала функционировать и проработала еще около 4 суток, передавая некоторые данные о состоянии космического корабля. На основании этой информации был сделан вывод, что выключение установки произошло в результате срабатывания части аварийных стержней системы регулирования реактора. Анализ результатов наземных и летных испытаний показал, что наиболее вероятной причиной остановки реактора было повреждение регулятора напряжения, установленного в энергосистеме аппарата «Аджена» [21]. Вероятно, повреждение регулятора явилось причиной подачи ложной команды на остановку реактора от бортового декодирующего устройства, что и подтвердили наземные испытания.

Летные испытания системы СНАП-10А показали, что ядерные энергетические установки такого типа можно использовать в качестве источников питания на космических кораблях. Подготовка и запуск таких установок может производиться по обычной программе и не требует специального наземного оборудования. Подобные установки способны длительное время работать в условиях невесомости и глубокого вакуума.

Проекты космических термогенераторов мощностью несколько киловатт. Опыт создания и эксплуатации установки СНАП-10А показал возможность дальнейшего усовершенствования системы и повышения температуры теплоносителя на выходе из реактора до 700° С. В связи с этим была проведена разработка конструкции установки электрической мощностью 2 *квт* применительно к беспилотным космическим системам. Повышение температуры теплоносителя до 704° С (такая температура была достигнута в реакторе СНАП-8 [22]) позволяет увеличить мощность с 0,4 до 1,2 *вт* на термопару из сплава кремний — германий. Срок службы реактора такой системы (тепловая мощность 100 *квт*) составляет три года. Однако эта характеристика может быть увеличена до шести лет, если снизить температуру теплоносителя до 620° С, при этом вес системы возрастет до 635 *кг*, а площадь излучателя — до 14 *м²*.

На основе разработки указанной установки были проведены оценки возможности создания систем мощностью до 8 *квт*. Характеристики этих систем приведены в табл. 8.6.

Таблица 8.6

Характеристики реакторных ТЭГ [23]

Характеристика	Значение			
Электрическая мощность, <i>квт</i>	0,5	2	5	8
Температура теплоносителя, °С	704	704	704	704
Надежность системы	0,85	0,85	0,85	0,85
Высота установки, <i>м</i>	2,3	4,0	6,4	8,2
Вес защиты, <i>кг</i>	317	490	790	1150
Площадь излучателя, <i>м²</i>	2,3	9,1	22	35
Срок службы, годы	5	3	1,8	1,2

Дальнейшие исследования определили возможность усовершенствования конструкции термоэлементов. Цилиндрический термостолбик установки СНАП-10А предполагается разрезать по высоте на две половины и скоммутировать их по горячей стороне вольфрамом. Это позволит исключить массивные пластины из меди и снизить вес системы. Расчеты, приведенные в работе [22], показывают, что при увеличении мощности установки типа СНАП-10А до 20 *квт* ее вес возрастет только в 5—6 раз.

Исследования реакторных термогенераторов космического назначения ведутся также в странах Западной Европы. Например, в ФРГ фирма «Сименс-Шукерт» совместно с «Интератомом» разрабатывает установку электрической мощностью 2—3 *квт* с NaK-теплоносителем. Температура теплоносителя на выходе из реактора 850° С, а температура излучателя 400° С. В качестве термоэлектрического материала используется сплав 70 ат. % кремния + 30 ат. % германия [24].

Реакторные термогенераторы для работы под водой

В в е д е н и е. При работе под водой ядерный источник тепла имеет решающее преимущество перед источником на химическом топливе, так как последний не может работать в отсутствие окислительной среды, необходимой для горения топлива. Для работы ядерной установки окислительная среда не требуется, она может успешно эксплуатироваться в инертной атмосфере и в вакууме. Это обстоятельство, обеспечивающее большую автономность плавания, а также высокая надежность в эксплуатации позволили атомным энергетическим установкам завоевать в сравнительно короткое время прочные позиции в подводном флоте.

Помимо подводных лодок энергетические установки могут быть использованы в установках для исследования богатств континентального шельфа, навигации и других целей. Океан — естественное хранилище полезных ископаемых (руды, металлы, нефть) и пищевых продуктов. Для освоения этих богатств необходимо научиться работать в океане так же, как на суше. До последнего времени все работы в море велись с поверхности воды с помощью телеустановок с дистанционным управлением, подводных манипуляторов и устройств для сбора и передачи информации. Однако эти устройства не могут заменить человека под водой. Поэтому за последние годы начали создаваться обитаемые подводные лаборатории, экипажи которых могут исследовать физические явления в океане, изучать жизнь его обитателей, выполнять монтаж оборудования подводных нефтяных скважин, вести строительные работы, исследовать геологию морского дна и т. д.

Однако все эти лаборатории представляют собой несамостоятельные сооружения, транспортируемые с помощью надводных судов, которые снабжают подводные лаборатории электроэнергией, пресной водой и воздухом. Для решения проблемы автономности подводных лабораторий необходимы источники снабжения электроэнергией и пресной водой, находящиеся на борту лабораторий. В качестве таких источников могут быть использованы аккумуляторные батареи, изотопные и реакторные термогенераторы. Применение аккумуляторных батарей в значительной степени ограничивается сравнительно небольшим запасом энергии, характерным для этих систем. Иногда могут быть использованы изотопные термогенераторы, характеризующиеся безопасностью и высокой надежностью в эксплуатации. Однако эти источники ограничены по мощности (оптимальная мощность порядка нескольких киловатт). По-видимому, лучшее решение указанной выше проблемы — реакторные термогенераторы, которые позволяют получать необходимую мощность для перемещения, освещения и обогрева подводной лаборатории, а также для получения пресной воды и кислорода из морской воды. Подводные лаборатории, оснащенные таким источником энергии, будут подобно подводным

лодкам автономно передвигаться, всплывать и погружаться. Для этих целей может оказаться вполне подходящим реактор с водой под давлением, который хорошо зарекомендовал себя в атомных силовых установках современных подводных лодок.

В рассматриваемых ниже проектах реакторных термогенераторов предполагается использовать водо-водяной реактор с естественной циркуляцией теплоносителя, обеспечивающей высокую надежность установки.

Т е р м о г е н е р а т о р м о щ н о с т ь ю 50 квт. В 1964 г. фирма «Дженерал дайнемикс корпорейшн» запатентовала ядерную энергетическую установку электрической мощностью 50 квт с термоэлектрическим генератором, предназначенную для использования в глубоководных аппаратах типа батискафа «Триест» и рассчитанную для работы как на поверхности моря, так и на глубине до 750 м [25]. Эта ядерная энергетическая установка содержит реактор, заключенный в корпус под давлением, водяной теплоноситель, циркулирующий за счет свободной конвекции и термоэлектрический преобразователь, расположенный в верхней части корпуса давления.

Общий вид установки показан на рис. 8.20.

Активная зона цилиндрической формы собирается из 110 твэлов, каждый из которых содержит таблетки из смеси обогащенного урана и гидрида циркония (92%), заключенных в оболочку из нержавеющей стали. Активная зона монтируется на внутреннем опорном цилиндре из нержавеющей стали толщиной 3 мм, который также разделяет холодный и горячий потоки теплоносителя. Поэтому внутренняя поверхность опорного цилиндра покрыта слоем теплоизоляции толщиной 6 мм. В верхней части опорного цилиндра имеются отверстия, через которые вода из активной зоны поступает к горячим спаям термоэлементов. Цилиндр расположен коаксиально в корпусе давления и крепится к опорному фланцу, находящемуся в верхней части корпуса давления.

Нижняя часть корпуса давления, покрытая слоем теплоизоляции, монтируется внутри бака шарообразной формы диаметром 4,5 м, изготовленного из стали толщиной 6 мм. Верхняя часть выступает из бака и на ней крепятся термоэлементы. Бак заполняется теплоносителем, используемым для защиты от нейтронного излучения. Корпус реактора рассчитан на давление 105 атм и рабочую температуру 315° С. Для изготовления корпуса может быть использован инконель толщиной 2,54 см или другой сплав с высоким содержанием хрома и никеля.

Система регулирования реактора содержит шесть поглощающих пластин, каждая из них имеет длину 70 см, ширину 10 см и толщину 0,65 см. Верхняя поглощающая секция пластины длиной 35 см содержит сплав кадмия (5 вес. %), индия (15 вес. %) и серебра (80 вес. %). Нижняя секция изготавливается из циркония с целью вытеснения воды из зоны регулирования и выравнивания потока тепловых нейтронов. Система регулирования имеет ход 26 см.

Термоэлектрический преобразователь цилиндрической формы монтируется на верхней части корпуса давления, поэтому активная зона реактора отделена от преобразователя некоторым расстоянием, позволяющим уменьшить действие излучения на термоэлектрический материал. Горячие спаи элементов находятся в тепловом контакте с корпусом давления, но электрически изолированы от него. Термо-

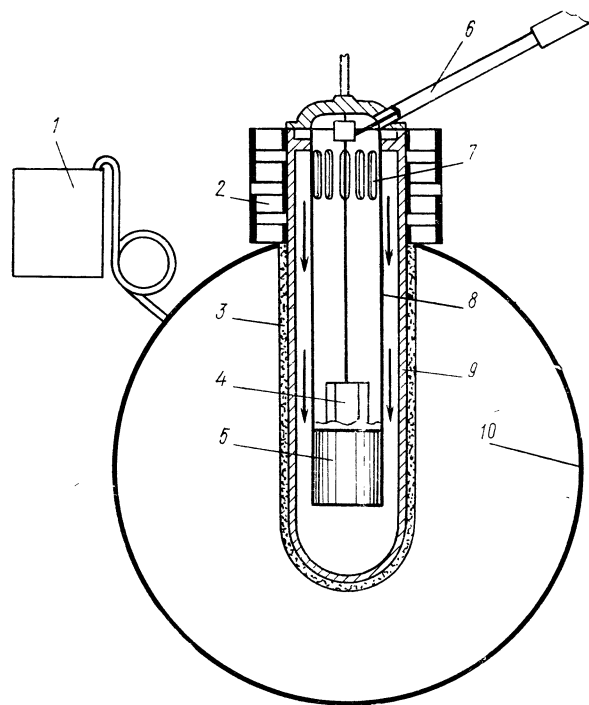


Рис. 8.20. Термогенератор мощностью 50 кВт для глубоководного использования:

1 — компенсатор объема; 2 — термоэлементы; 3 — корпус давления; 4 — пластины системы регулирования; 5 — активная зона; 6 — привод системы регулирования; 7 — отверстия для слива горячей воды из реактора; 8 — опорный цилиндр; 9 — теплоизоляция; 10 — шаровой бак.

генератор заключен в оболочку, охлаждаемую морской водой. Оболочка находится в тепловом контакте с холодными спаями термоэлементов, но электрически от них изолирована. Зазоры между термоэлементами заполнены теплоизоляцией. Материалом *n*-типа служит теллурид свинца с добавкой иодистого свинца, а *p*-типа — теллурид свинца с добавкой натрия. В качестве изоляции предполагается использовать слюду.

Технологическая схема установки предусматривает нагрев водяного теплоносителя в активной зоне реактора и циркуляцию его вследствие естественной конвекции. Вода, нагретая в активной зоне,

поднимается вверх и через отверстия в опорном цилиндре поступает к горячим спаям термоэлементов. Далее вода опускается вниз по зазору между корпусом давления и опорным цилиндром и поступает снова в активную зону внизу. Тепловой поток проходит через термоэлементы, оболочку генератора и сбрасывается в забортную морскую воду.

Для обеспечения рабочего давления в корпусе реактора предусмотрен компенсатор объема, в котором в качестве газовой подушки используется водород. Водород, кроме того, гидрирует теплоноситель и препятствует накоплению в нем кислорода, образующегося в результате радиолитического разложения воды. С помощью компенсатора объема в системе устанавливается рабочее давление 77 атм, что обеспечивает нормальную эксплуатацию установки на уровне моря и на глубинах, где давление морской воды ниже рабочего давления.

Чтобы избежать разрушения реактора при аварийном погружении установки на глубину, где внешнее давление значительно больше рабочего давления теплоносителя, предусмотрено специальное устройство. Корпус давления соединен с защитным баком через клапан, который открывается, когда давление в защитном баке превышает давление в корпусе реактора. Защитный бак, в свою очередь, снабжен гибким компенсатором объема с пневматической подушкой, который изготавливается из эластичного материала (пластмасса или резина). Этот компенсатор передает давление забортной морской воды воде защитного бака. Если внешнее давление и, следовательно, давление в защитном баке выше рабочего давления в системе, клапан открывается и давление в этих объемах выравнивается. Для поддержания требуемой чистоты теплоносителя в системе предусмотрен деминерализатор.

Пуск установки осуществляется на поверхности моря. В компенсаторе объема с помощью компрессора устанавливается рабочее давление водорода 77 атм. Затем из активной зоны постепенно выводятся стержни регулирования, температура воды в реакторе увеличивается и начинается циркуляция теплоносителя вследствие естественной конвекции.

После выхода на рабочий режим регулирование реактора обеспечивается отрицательным температурным коэффициентом реактивности системы. На глубине 750 м давление морской воды становится сравнимым с давлением в корпусе реактора, и открывается клапан, соединяющий защитный бак с корпусом давления. При дальнейшем погружении установки этот клапан остается открытым и давление в контуре реактора, и внешнее давление морской воды всегда уравновешены.

Путем модификации конструкции и рабочих характеристик описанная ядерная энергетическая установка может быть легко приспособлена для использования на многих управляемых и неуправляемых подводных судах, где требуется безопасный и надежный источник энергии. Основные характеристики ТЭГ:

Тепловая мощность, <i>квт</i>	1000
Полезная электрическая мощность, <i>квт</i>	50
К. п. д., %	5
Топливо	Уран+гидрид циркония
Загрузка урана-235, <i>кг</i>	4,1
Длина твэла, <i>см</i>	53
Диаметр твэла, <i>см</i>	3,8
Температура воды в активной зоне, °С	288
Давление воды в системе, <i>атм</i>	77
Размеры корпуса давления, <i>см</i> :	
высота	457
диаметр	81
Термоэлектрический материал	Теллуристый свинец
Число термоэлементов, шт.	20 000
Температура, °С:	
горячего спая	288
холодного спая	10

Проекты термогенератора мощностью 100 *квт*. Фирмой «Мартин» разработан проект источника электрического питания, включающий реактор с водой под давлением и термоэлектрический генератор мощностью 100 *квт*. Установка предназначена для работы под водой на глубине до 5600 м без обслуживающего персонала. Генератор дает постоянный ток напряжением 40 в, которое с помощью машинного преобразователя может быть увеличено до 100 в. В установке имеется накопитель энергии в виде никель-кадмиевых батарей, способных выдавать импульсы мощности в несколько мегаватт. Основные характеристики этой установки [26]:

Средняя электрическая мощность, <i>квт</i>	100
Пиковая электрическая мощность, <i>Мвт</i>	5—10
Тепловая мощность реактора, <i>квт</i>	2500
Общий к. п. д., %	4
Топливо	UO ₂
Габаритные размеры установки, <i>м</i> :	
высота	5,5
диаметр	3,05
Вес установки, <i>Т</i> :	
до погружения	45,4
в погруженном состоянии	39,5
Вес накопителей энергии, <i>Т</i>	8,6
Глубина погружения, <i>м</i>	До 5600
Срок службы, годы	До 4 лет

Установка состоит из верхнего и нижнего корпусов высокого давления сферической формы, соединенных трубопроводами, по которым циркулирует теплоноситель (рис. 8.21). Вертикальное расположение установки в рабочем состоянии обеспечивается с помощью якоря. В нижнем корпусе диаметром 156 *см* и толщиной стенки 17 *см* располагается активная зона и защитные экраны реактора. Верхний и нижний сферические корпуса соединены четырьмя трубами: одна диаметром 40,6 *см* и толщиной стенки 7,5 *см*, по которой теплоноситель поднимается из активной зоны в верхний сосуд (вследствие естественной циркуляции), и три трубопровода обратного потока

теплоносителя с внешним диаметром 20 *см* и толщиной стенки 4 *см*. В верхнем корпусе диаметром 125 *см* и толщиной стенки 10 *см* располагается термоэлектрический преобразователь и приводы стержней регулирования реактора. Указанная компоновка оборудования вызвана необходимостью снижения уровня облучения термоэлементов до допустимых пределов. Внутренняя поверхность корпусов давления, трубопроводов и узлов, соприкасающихся с теплоносителем, покрыта оболочкой из коррозионностойкого материала (инконеля).

Ядерный реактор. Активная зона реактора цилиндрической формы содержит 12 топливных сборок квадратного сечения. Каждая сборка состоит из 104 твэлов, расположенных между верхней и нижней решетками с шагом 1,65 *см*. Жесткость топливной сборки обеспечивается четырьмя элементами, расположенными по углам решеток и выполняющими роль стяжек. Твэлы изготавливаются из прессованных таблеток двуокиси урана, заключенных в трубки из инконеля. Активная длина твэла 71 *см*. В качестве выгорающего поглотителя используется природный бор, который вводится в материал оболочки в количестве $7,5 \cdot 10^{-2} \%$.

Активная зона реактора имеет следующие основные характеристики:

Топливо	UO ₂
Обогащение, %	8,7
Загрузка урана-235, <i>кг</i>	73
Максимальная температура в центре твэла, °С	1080
Средняя температура поверхности топлива, °С	346
Активная зона, <i>см</i> :	
диаметр	71
высота	71
Выгорающий поглотитель	Природный бор
Количество стержней регулировки, шт.	4
Поглощающий материал стержней регулирования	Карбид бора
Температурный коэффициент реактивности, $\Delta k/(k \cdot ^\circ\text{C})$	$-4 \cdot 10^{-4}$

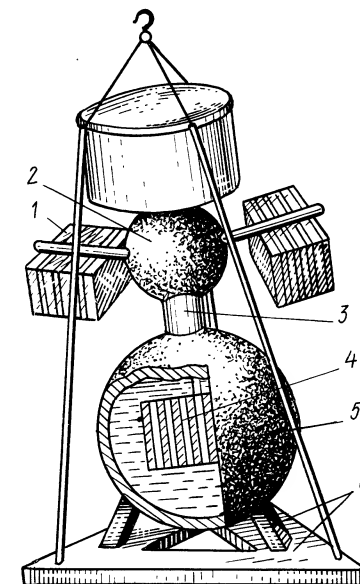


Рис. 8.21. Термогенератор мощностью 100 *квт*:

1 — термоэлектрический преобразователь; 2 — верхний корпус давления; 3 — трубопровод теплоносителя; 4 — активная зона реактора; 5 — нижний корпус давления; 6 — опорная конструкция.

Коэффициент неравномерности энерго-
выделения:

по радиусу	1,6
по высоте	1,4
Продолжительность кампании, <i>Мвт·лет</i>	11

Управление реактором осуществляется с помощью регулирующих стержней, представляющих собой трубку из никеля, заполненную порошком из карбида природного бора. Общая загрузка карбида бора составляет 3970 г (610 г бора-10).

Применение воды в качестве замедлителя нейтронов обеспечивает значительный отрицательный температурный коэффициент реактивности. В соответствии с этим регулирующие стержни в данном реакторе используются только для компенсации избыточной реактивности чистой холодной активной зоны, которая равна 0,122 $\Delta k/k$. После установки реактора в назначенном месте под водой регулирующие стержни выводятся из активной зоны и дальнейшее автоматическое регулирование обеспечивается отрицательным температурным коэффициентом реактивности (независимо от потребляемой мощности). В период всего срока службы установки компенсация выгорания топлива осуществляется вследствие выгорающего поглотителя.

Для защиты стенок корпуса давления от теплового и радиоактивного воздействий активная зона окружена тепловыми экранами, состоящими из слоев воды и конструкционной стали общей толщиной 33 см. Эта защита снижает интегральный поток на стенку корпуса до 10^{18} нейтрон/см². Экраны также служат для направления потока теплоносителя.

Термоэлектрический преобразователь разделен на три крупные секции, каждая из которых имеет длину 157 см и ширину 76 см. С целью увеличения к. п. д. преобразователя используются слоистые элементы. Из 2500 кВт тепловой мощности, генерируемой в активной зоне реактора, к горячим спаям элементов поступает 2180 кВт, 320 кВт отдается морской воде, окружающей корпус давления и трубопроводы. ТЭГ имеет следующие основные характеристики:

Электрическая мощность, <i>квт</i>	131
Тепловая мощность, подводимая к ТЭГ, <i>квт</i>	2180
К. п. д., %	6
Напряжение, <i>в</i>	40
Ток, <i>а</i>	3300
Количество термоэлементов, шт.	3570
Термоэлектрические материалы:	
р-ветвь — горячая сторона	PbTe
» холодная сторона	BiSbTe
п-ветвь — горячая сторона	PiSnTe
» холодная сторона	BiSeTe — PbSeTe
Температура горячего спая, °С	285
Температура холодного спая, °С	60
Сечение термоэлемента, <i>см²</i>	20
Высота термоэлемента, <i>мм</i>	9,6
Материал коммутации	Медь

В процессе разработки конструкции ТЭГ проводились испытания термоэлементов диаметром от 65 до 80 мм, изготовленных методом горячего прессования. Отмечено, что с увеличением диаметра элемента возрастает разность коэффициентов термического расширения между термоэлектрическим и барьерным материалами. Проводятся дальнейшие работы по подбору материалов и разработке технологии изготовления термоэлектрических батарей.

Тепловая схема установки основана на естественной циркуляции теплоносителя. Нагретая в реакторе вода поднимается по вертикальному трубопроводу в расширительный бак верхнего корпуса давления и распределяется между тремя коллекторами, расположенными под углом 120° друг относительно друга. Далее вода поступает к секциям термодвигателя, проходя при этом систему специальных дросселирующих отверстий, обеспечивающих равномерное распределение теплоносителя между сборками генератора. Теплоноситель, охлажденный до 324° С (до 302° С в конце срока службы), поступает по трем трубам обратно в активную зону. Длительность цикла приблизительно 50 сек.

Ниже приведены некоторые характеристики тепловой схемы.

Расход теплоносителя, <i>т/ч</i>	105,6
Скорость циркуляции теплоносителя, <i>м/сек</i>	0,27
Максимальное давление теплоносителя, <i>кг/см²</i>	155
Температура теплоносителя, °С:	
на входе в активную зону (в начале и в конце срока службы)	324/302
на выходе из активной зоны	343/320

Для защиты персонала от ионизирующих излучений в случае перевода установки на другое место, при смене твэлов или во время ремонтных работ предусматриваются две оболочки, окружающие корпус реактора. Эти оболочки предназначены для удержания морской воды, когда реактор поднят на поверхность и целиком извлечен из воды. Слой воды в оболочках толщиной 60 см снижает мощность дозы излучения через 4 ч после остановки реактора до 1 р/ч. В случае необходимости, если γ-фон окажется более высоким, внутреннюю защитную оболочку можно заполнить свинцовой дробью или другими временными защитными материалами. При транспортировке по воде реакторная установка может быть закреплена на корпусе судна таким образом, чтобы она все время находилась под слоем воды.

Пуск установки. Реактор включается, когда энергетическая установка находится под водой на заданной глубине. Регулирующие стержни выводятся из активной зоны со скоростью, определяемой допустимым ростом температур. Управление перемещением стержней производится с поверхности при помощи электрической, гидравлической или механической систем передач. Ввод в действие реактора может производиться одновременным выводом всех регулирующих стержней из активной зоны. При этом температура теплоносителя возрастает до 360° С. Далее по достижении равновесного накопления ксенона температура теплоносителя постепенно снижается до

нормы (343° С). Другой способ пуска реактора состоит в шаговом выводе регулирующих стержней с учетом скорости накопления ксенона без существенного превышения рабочей температуры теплоносителя.

В рассматриваемой реакторной установке невозможны такие аварийные ситуации, как потеря теплоносителя или прекращение его циркуляции, поскольку система не имеет насосов и во время работы под водой наружное давление морской воды выше давления в системе. Безопасность работы реактора обеспечивается в целом вследствие отрицательного температурного коэффициента реактивности, остро реагирующего на незначительное отклонение температуры активной зоны от номинального уровня. Эта характеристика реактора экспериментально проверена в опытах на выброс мощности, которые продемонстрировали вполне удовлетворительную устойчивость такого реактора.

Данный проект реактора с водой под давлением, естественной циркуляцией и регулированием по температуре предпочтителен в сравнении с другими современными системами, особенно с точки зрения безопасности и надежности в эксплуатации. Конструкция реактора основана в значительной мере на использовании проверенных узлов и элементов. Например, твэлы по конструкции аналогичны твэлам реактора МН-1А, но несколько короче. Выгорающий поглотитель сходен с системой, использованной в реакторах АЭС в Индиан-Пойнт.

Подобные реакторные энергетические установки с термоэлектрическим преобразованием энергии, по мнению фирмы «Мартин», могут найти применение для исследовательских, коммерческих и военных целей.

Фирмой «Мартин» предложен другой проект реакторного термогенератора [27], в котором в качестве теплоносителя используется фосфид серы P_4S_3 . Теплоноситель кипит в реакторе, его пары поступают к термогенератору, конденсируются на горячих спаях термоэлементов и жидкий P_4S_3 возвращается обратно в реактор. Холодные спаи элементов охлаждаются водой. Основные проектные характеристики такой установки приведены в работе [28]:

Электрическая мощность, кВт	100
К. п. д., %	8
Топливо и замедлитель	Гидрид циркония+уран
Теплоноситель	P_4S_3
Температура теплоносителя, °С	540
Термоэлектрический материал:	
<i>p</i> -ветвь	PbTe+BiTeSb
<i>n</i> -ветвь	PbTe+BiSeTe
Высота установки, м	5,8
Диаметр установки, м	1,2
Общий вес, кг	8470
Срок службы, годы	5

В обоснование предложенного проекта по заданию фирмы «Мартин» исследовалась совместимость P_4S_3 с такими конструкционными материалами, как углеродистые и нержавеющие стали и циркониевые сплавы. Наиболее стойким из исследованных металлов оказался циркалой-2, скорость коррозии которого в контакте с P_4S_3 при температуре 540° С не превышала 0,025 мм/год. Помимо коррозионных испытаний изучалась радиационная стойкость образцов P_4S_3 , которые облучались γ -квантами кобальта-60 дозой в 10^5 рад и не изменили своих характеристик. По мнению фирмы «Мартин», анализ результатов экспериментальных исследований показал возможность осуществления энергетической системы на P_4S_3 с естественной циркуляцией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

К главе 1

1. Эпинус Ф. У. Т. Теория электричества и магнетизма. Ред. и примеч. Я. Г. Дорфмана. М., Изд-во АН СССР, 1951, с. 448.
2. Физические основы электротехники. Пер. с англ. Под ред. К. М. Поливанова. М. — Л., Госэнергоиздат, 1950, с. 159.
3. Иоффе А. Ф. Физика полупроводников. М. — Л., Изд-во АН СССР, 1957, с. 356—387.
4. Очерки истории радиотехники. Под ред. Б. С. Сотина. Изд-во АН СССР, 1960, с. 66, 67.
5. Даниель-Бек В. С., Рогинская Н. С. Термоэлектродгенераторы. М., «Связьиздат», 1961, с. 1—55.
6. Воронин А. Н. Полупроводниковые термоэлектродгенераторы. Изд-во Ленинград. Дома науч.-техн. пропаганды (общ. «Знание»), 1957, с. 1—48.
7. Иорданишвили Е. К. Термоэлектрические источники питания. М., «Советское радио», 1968, с. 7—24.
8. Путилов К. А. Курс физики. Т. 2. М. Гостехтеориздат, 1954, с. 171—182.
9. Эйхенвальд А. А. Электричество. Изд. 7-е. М. — Л., Гостехтеориздат, 1932, с. 167.
10. Калашников С. Г. Электричество. М., «Наука», 1970, с. 500—502.
11. Соминский М. С. Полупроводники. Л., «Наука», 1967, с. 176—182.
12. Путилов К. А. Курс физики. Т. 2. М., Гостехтеориздат, 1954, с. 181—182.
13. Цидильковский И. М. Термомагнитные явления в полупроводниках. М., Физматгиз, 1960, с. 10—14.
14. Соминский М. С. Солнечная электроэнергия. М. — Л., «Наука», 1965, с. 200—202.
15. История энергетической техники СССР. М. — Л., Госэнергоиздат, 1957, с. 57—103.
16. Соминский М. С. Абрам Федорович Иоффе. М. — Л., «Наука», 1964, с. 190—283.
17. Развитие физики в СССР. Книга 1. М., «Наука», 1967, с. 323—344.
18. Развитие термоэлектрического метода преобразования. — В сб. «Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую и топливные элементы». Информ. бюлл. Изд-во АН СССР, 1965, вып. 1, с. 89—93.
19. Иоффе А. Ф. Полупроводниковые термоэлементы. М. — Л., Изд-во АН СССР, 1956, с. 6—13.
20. Воронин А. Н. и др. Доклад СССР № Р/318, представленный на III Международную конференцию по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1964, с. 176—184.
21. Кирьянов Г. И. и др. Радиационная техника. — В сб. «Советская атомная наука и техника». М., Атомиздат, 1967, с. 323—347.
22. Охотин А. С. и др. Термоэлектрические генераторы. М., Атомиздат, 1971, с. 257—274.
23. Арифов У. А., Кулагин А. И. Некоторые вопросы гелиоэнергетики в СССР. — «Гелиотехника», 1968, № 3, с. 5—14.

24. Баум В. А. и др. Возможности использования солнечной энергии в районах с благоприятным климатом, на примере Туркменской ССР. (Доклад СССР № 71, представленный на VII конгресс Мировой энергетической конференции. Москва, август 1968.)
25. Тепляков Д. И. и др. Калориметрические исследования концентратора солнечной энергии термоэлектрической водоподъемной установки. — В сб. «Преобразователи солнечной энергии на полупроводниках». М., «Наука», 1968, с. 109—125.
26. Черкасский А. Х. Современные термоэлектрические генераторы. — В сб. «Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую и топливные элементы». Информ. бюлл. М., Изд-во АН СССР, 1967, вып. 12, с. 85—101.
27. Петросьянц А. М., Поздняков Б. С. Атомная техника. — В сб. «Энергетическая, атомная, транспортная и авиационная техника, космонавтика». М., «Наука», 1969, с. 149—200.

К главе 2

1. Иоффе А. Ф. Полупроводниковые термоэлементы. М. — Л., Изд-во АН СССР, 1956, с. 13—41.
2. Чанг Ш. Преобразование энергии. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1967, с. 86—109.
3. Иоффе А. Ф. Физика полупроводников. М. — Л., Изд-во АН СССР, 1957, с. 356—387.
4. Стильбанс Л. С. Термоэлектрические явления. — В сб. «Полупроводники в науке и технике». Т. 1. М. — Л., Изд-во АН СССР, 1957, с. 113—133.
5. Глазов В. М. и др. Методы исследования термоэлектрических свойств полупроводников. М., Атомиздат, 1969, с. 36—122.
6. Соминский М. С. Полупроводники. М. — Л., «Наука», 1967, с. 5—185.
7. Иоффе А. Ф. и др. Термоэлектрическое охлаждение. М. — Л., Изд-во АН СССР, 1956, с. 110.
8. Охотин А. С. Исследование теплопроводности теллуридов. — В сб. «Теплоэнергетика». М., Изд-во АН СССР, 1960, вып. 2, с. 99—110.
9. Иорданишвили Е. К. Термоэлектрические источники питания. М., «Советское радио», 1968, с. 4—35.
10. Иорданишвили Е. К. Полупроводниковые термоэлектрические материалы. Изд-во Ленингр. Дома научн.-техн. пропаганды, (о-во «Знание»), 1963, с. 40.
11. Стильбанс Л. С. Физика полупроводников. М., «Советское радио», 1967, с. 292—330.
12. Самойлович А. Г., Коренблит А. Л. Современное состояние теории термоэлектрических и термомагнитных явлений в полупроводниках. — «Успехи физ. наук», 1953, т. 49, № 2—3, с. 337.
13. Бобсон Н. Измерение ТЭДС полупроводников методом горячего зонда. — В сб. «Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую». Информ. бюлл. М., Изд-во АН СССР, 1962, вып. 5, с. 58—61.
14. Калашников С. Г. Электричество. Изд. 3-е. М., «Наука», 1970, с. 493.
15. Физические основы электротехники. Пер. с англ. Под ред. К. М. Поливанова. М. — Л., Госэнергоиздат, 1950, с. 159—163.
16. Тамм И. Е. Основы теории электричества. Изд. 8-е. М., «Наука», 1966, с. 185—191.
17. Wolfe R., Smith G. Semimetals as thermoelectric materials. — «Semicond. Prod.», 1963, v. 6, No. 4, p. 29—33.
18. Жилик К. К. Термоэлектрические свойства тонких пленок олова. — «Физ. металлов и материаловедение», 1967, т. 23, вып. 1, с. 187—188.
19. Тауц Я. Фото-и термоэлектрические явления в полупроводниках. Пер. с чешск. М., Изд-во иностр. лит., 1962, с. 188—199.
20. Цидильковский И. М. Термомагнитные явления в полупроводниках. М., Физматгиз, 1960, с. 7—22.

21. Angrist S. A Nernst effect power generator.—Paper. Amer. Soc. Mechen. Engrs», 1962, No. 36, p. 8.
22. Кулиев А. А. Гальваноманнитные свойства твердых растворов висмут — сурьма. — Изв. АН АзССР. Сер. физ.-техн.-матем., 1967, № 3—4, с. 17—24.
23. Goldsmit H. Conference of recent applications of semiconductors. — «J. Appl. Phys.», 1963, v. 14, No 12, p. 831—834.
24. Norwood M. Theory of Nernst generators and refrigerators. — «J. Appl. Phys.», 1963, v. 34, No. 3, p. 594—599.
25. Путилов К. А. Курс физики. Т. 2. М., Гостехтеориздат, 1954, с. 153—182.
26. Голдсмит Г. Применения термоэлектричества. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1963, с. 24—26.
27. Кремнев В. А. О расчете термоэлектрических параметров термогенераторов. — В сб. «Радиационная техника». Вып. 1. М., Атомиздат, 1967, с. 158—167.
28. Белевцев А. Т. и др. Авторское свидетельство СССР № 190448. «Бюл. изобрет.», 1966, № 2.
29. Иорданишвили Е. К., Стильбанс Л. С. Каскадные термоэлектрические генераторы. — В сб. «Термоэлектрич. свойства полупроводников» (Труды I и II совещаний по термоэлектричеству). М. — Л., Изд-во АН СССР, 1963, с. 95—102.
30. Кремнев В. А., Геронин Д. Е. О расчете термоэлектрического преобразователя. — В сб. «Радиационная техника». Вып. 2. М., Атомиздат, 1968, с. 30—42.
31. Rosi F. e. a. Semiconducting materials for thermoelectric power generation. — «RCA Review», 1961, v. 22, No. 1, p. 82—121.
32. Шоу Д. Оптимизация свойств ТЭГ с помощью эффекта Томсона. — В сб. «Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую и топливные элементы». Информ. бюл. М., Изд-во АН СССР, 1967, вып. 3, с. 64—67.
33. Иорданишвили Е. К. Эффективность термоэлектрического материала, используемого в широком интервале температур. — «Журн. техн. физ.», 1967, т. 37, № 2, с. 384—386.
34. Мойжес Б. Я. и др. О выборе оптимального режима каскадного термоэлемента. — «Журн. техн. физ.», 1962, т. 32, № 4, с. 461—472.
35. Гаибназаров М., Малевский Ю. Н. Многокаскадные термоэлементы и методы их расчета. — В сб. «Преобразование солнечной энергии на полупроводниках». М., «Наука», 1968, с. 25—31.
36. Бурштейн А. И. Физические основы расчета полупроводниковых термоэлектрических устройств. М., Физматгиз, 1962, с. 132.
37. Джамбино Дж. Термоэлектрические свойства тугоплавких материалов. — В сб. «Термоэлектрические материалы и преобразователи». Пер. с англ. М., «Мир», 1964, с. 174—224.
38. Боббин В. П. Еще об одном экстремальном режиме работы ТЭГ. — «Журн. техн. физ.», 1967, т. 37, № 3, с. 579—585.
39. Безгин В. П. К тепловому расчету термоэлектрических генераторов. — «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1967, № 2, с. 109—115.
40. Охотин А. С. и др. Термоэлектрические генераторы. М., Атомиздат, 1971, с. 88—142.
41. Лискер И. С. Авторское свидетельство СССР № 186538. «Бюл. изобрет.», 1966, № 19.
42. Лискер И. С. Вариационные методы экспериментального исследования тепло- и электрических свойств полупроводниковых материалов. Экспериментальные установки для определения тепло-и электрических параметров полупроводников. — В сб. «Преобразователи солнечной энергии на полупроводниках». М., «Наука», 1968, с. 62—92.
43. Белевцев А. Т. и др. Определение добротности полупроводниковых термоэлектрических устройств при постоянном тепловом потоке. — «Теплофизика высоких температур», 1967, № 5, с. 901.

К главе 3

1. Bunklaus I. H. Brenstoffbeheizte thermoelectrische Generatoren mit hohen Wirkungsgrad für die Directumwandlung von Wärme in Elektrizität. — «Oil und Gas Feuer», 1968, v. 13, No. 3, p. 281—289.
2. Халаз Д. и др. Доклад № 173 (Венгрия), представленный на VII конгрессе Мировой энергетической конференции. Москва, август 1968.
3. Старостин Л. Н. Авторское свидетельство СССР № 36957. «Вестн. Комитета по изобрет.», 1934, № 5—6.
4. Воронин А. И. Полупроводниковые термогенераторы. Изд-во Ленинград. Дома научн.-техн. пропаганды, 1957, с. 29.
5. Черкасский А. Х. Авторское свидетельство СССР № 119902, 120552, 120558. «Бюл. изобрет.», 1959, № 10, 12.
6. Nottage H. B. Thermoelectric generator of the alternating current. — «Eng. for power», 1963, No. 10, p. 58—72.
7. Иорданишвили Е. К. Термоэлектрические источники питания. М., «Советское радио», 1968, с. 110—172.
8. Plevyak T. Improved thermoelectrical generator performance with vapor phase cooling. — «Advanced Energy Convers», 1966, v. 6, No. 2, p. 71—75.
9. Борзов Г. Г. и др. Термогенератор для сверхпроводящих соленоидов. — «Журн. техн. физ.», 1968, т. 38, № 10, с. 1817—1821.
10. Бернес К., Кейдж Р. Электромагнитные насосы. — В сб. «Жидкометаллические теплоносители». Пер. с англ. Под ред. А. Е. Шейдлина. М., Изд-во иностр. лит., 1958, с. 216—226.
11. Помазанов И. Н., Тихомиров П. Л. Термоэлектрическое охлаждение за счет тепла низкопотенциальных источников. — В сб. «Термоэлектрические свойства полупроводников» (Труды I и II совещаний по термоэлектричеству). М. — Л., Изд-во АН СССР, 1963, с. 138—145.
12. Абдуллаев Г. Б. и др. Полупроводниковый термоэлектрический трансформатор тепловой энергии — «Гелиотехника», 1967, № 6, с. 3—8.
13. Thermoelectric device for air condition. — «Design News», 1964, v. 19, No. 13, p. 206.
14. Гольцман Б. М. и др. Опытные термоэлектрические батареи с полупроводниковым веществом высокой эффективности. — «Гелиотехника», 1968, № 3, с. 67—70.
15. Соминский М. С. Полупроводники. Л., «Наука», 1967, с. 407—409.
16. Малевский Ю. Н. и др. Исследование фотоэлектрического преобразования солнечной энергии — «Гелиотехника», 1968, № 3, с. 26—29.
17. Kittle E. Thermophotovoltaic energy conversion. — «Proc. 20-th the Ann. Power Sources Conf.», N. J., PSC Publ. Comm., 1966, p. 178—182.
18. Spring K., Swift-Hook D. Prospects of receipt electrical energy with use of thermoelectric method. — «Brit. J. Appl. Phys.», 1962, v. 13, No. 4, p. 159—170.

К главе 4

1. Шерман Б. и др. Расчет к. п. д. термоэлектрических преобразователей. В сб. «Термоэлектрические материалы и преобразователи». Пер. с англ. Под ред. А. И. Карчевского. М., «Мир», 1964, с. 212—240.
2. Иоффе А. Ф. и др. Термоэлектрическое охлаждение. М. — Л., Изд-во АН СССР, 1956, с. 42—64.
3. Клейн Ф. Свойства термоэлектрических материалов. — В сб. «Термоэлектрические материалы и преобразователи». Под ред. А. И. Карчевского. М., «Мир», 1964, с. 63—91.
4. Фушилло Н. Солнечные термоэлектрические генераторы на основе сплавов силицида германия, теллурида свинца и теллурида висмута для космических аппаратов, летящих к Венере и Меркурию. — В сб. «Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую и топливные элементы». Информ. бюл. М., Изд-во АН СССР, 1969, вып. 5, с. 83.

5. **Bernard W.** Патент США № 3009976, 1961.
6. **Telkas M.** Solar thermoelectric generators. — *J. Appl. Phys.*, 1954, v. 25, No. 6, p. 765—777.
7. **Иорданишвили Е. К.** Термоэлектрические источники питания. М., «Советское радио», 1968, с. 36—76.
8. **Иоффе А. Ф.** Полупроводниковые термоэлементы. М. — Л., Изд-во АН СССР, 1960, с. 82—113.
9. **Лафер Е.** Термические свойства Bi_2Te_3 и некоторых его твердых растворов. — В сб. «Термоэлектрические материалы и преобразователи». Под ред. А. И. Карчевского М., «Мир», 1964, с. 143—153.
10. **Rosi F. e. a.** Semiconducting materials for thermoelectric power generation—*RCA Rev. Techn. J.*, 1961, v. 22, No. 1, p. 82—121.
11. **Малевский Ю. Н.** В сб. «Теплоэнергетика». М., Изд-во АН СССР, 1960, вып. 2, с. 78—87.
12. **Thor W.**, Power Sources N. J. Pergamon press, 1967, p. 613—624.
13. **Риан Ф. и др.** Термоэлектрические свойства некоторых полупроводниковых соединений сульфида церия в интервале температур от -270 до $+1000^\circ\text{C}$. — В сб. «Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую». Информ. бюл. М., Изд-во АН СССР, 1962, вып. 5, с. 73—76.
14. **Девяткова Е. Д. и др.** О теплопроводности, электропроводности и термо-э. д. с. системы SbZn , а также о влиянии на них некоторых примесей других металлов. — *Журн. техн. физ.*, 1952, т. 22, вып. 1, с. 131.
15. **Чиркин В. С.** Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М., Атомиздат, 1968, с. 121—146.
16. **Варгафтик Н. Б.** Теплофизические свойства веществ. М., Госэнергоиздат, 1956, с. 117—380.
17. **Шмицлер З.** Термоэлектрические генераторы: состояние и развитие на 1963 г. — В сб. «Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую». Информ. бюл. М., Изд-во АН СССР, 1964, вып. 1, с. 81.
18. **Иоффе А. Ф.** Полупроводники в современной физике. М., Изд-во АН СССР, 1954, с. 300—349.
19. **Лошкарев Г. В., Самсонов Г. В.** Характеристики некоторых тугоплавких соединений переходных металлов как материалов для термоэлектрических преобразователей. — *Атомная энергия*, 1962, т. 13, вып. 2, с. 187—188.
20. **Емельянов В. С., Евстюхин А. И.** Металлургия ядерного горючего. М., Атомиздат, 1968, с. 30—31.
21. **Справочник** по машиностроительным материалам. Под ред. Г. И. Погодина-Алексеева. М., Машгиз, 1959, т. 2, с. 527—532.
22. **Glassburn C. e. a.** High temperature thermoelectric research. *IEEE Trans. Aeronautics*, 1964 v. 2, No. 2, p. 711—721.
23. **Фенити Р.** Окисный термоэлектрический генератор с высоким выходным напряжением. — *Электроника*, 1962, т. 35, № 5, с. 17—20.
24. **Кодофф И., Миллер Э.** Термоэлектрическая цепь. — В сб. «Термоэлектрические материалы и преобразователи». Пер. с англ. Под ред. А. И. Карчевского. М., «Мир», 1964, с. 25—37.
25. **Ried F. e. a.** Electrical properties of selected rare earth compounds and alloys.—*J. Electrochem. Soc.*, 1964, v III, No. 8, p. 943.
26. **Соминский М. С.** Полупроводники. М. — Л., «Наука», 1967, с. 190—215.
27. **Коломиец Б. Т.** Стеклообразные полупроводники. Л., Изд-во Ленинград. Дома научн.-техн. пропаганды, 1963, вып. 3, с. 10—33.
28. **Прямое преобразование энергии.** Пер. с англ. Под ред. С. В. Тимашева и Е. И. Янговского. М., «Мир», 1969, с. 56—125.
29. **Методы измерения температуры.** Пер. с англ. Под ред. В. А. Соколова. М., Изд-во иностр. лит., 1954, с. 77—80.
30. **Шраймер Х.** Получение термоэлектрических материалов методом порошковой металлургии. — В сб. «Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую». Информ. бюл. М., Изд-во АН СССР, 1964, вып. 5, с. 76—80.
31. **Городецкий А. Е. и др.** О возможности получения тонких слоев полупроводниковых соединений методом ионной бомбардировки. — *«Физика и техника полупроводников»*, 1968, т. 2, вып. 1, с. 136—137.
32. **Изготовление полупроводниковых материалов внедрением ионов.** — В сб. «Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую». Информ. бюл. М., Изд-во АН СССР, 1963, вып. 17, с. 57.
33. **Блум А. И., Регель А. Р.** Исследование термо-э. д. с. сплавов теллура и селена в твердом и жидком состоянии. — *Журн. техн. физ.*, 1953, т. XXIII, вып. 5, с. 783—787.
34. **Федоров В. И., Стильбанс Л. С.** Исследование теплопроводности жидких полупроводников. — *«Теплофизика высоких температур»*, 1967, т. 5, № 2, с. 232—238.
35. **Федоров В. И. и др.** Теплопроводность селенида висмута в жидкой фазе. — *«Теплофизика высоких температур»*, 1968, т. 6, № 2, с. 251—253.
36. **Cutler M., Mallon C.** Thermoelectric properties of liquid semiconductor solutions of thallium and tellurium.—*J. Appl. Phys.*, 1965, v. 36, No. 1, p. 667—672.
37. **Казанджан Б. И.** Влияние легирования на электропроводность и термо-э. д. с. Sb_2Se_3 в жидком состоянии. — *«Физика и техника полупроводников»*, 1968, т. 2, вып. 3, с. 400—403.
38. **Gradner J.** Liquids for thermoelectric generation. — *«The Engl. Electr. J.»*, 1963, v. 8, No. 4, p. 16.
39. **Edmond J.** On the suitability of liqued semiconductors for resistance thermometry in nuclear reactor. — *«J. Scient. Instrum.»*, 1968, v. 1, No. 4, p. 373—378.
40. **Конобеевский С. Т.** Действие облучения на материалы. М., Атомиздат, 1967, с. 30.
41. **Crawford J.** Radiation effects in diamond lattice semiconductors. — *«IEEE Trans. Nucl. Sci.»*, 1963, v. NS-10, No. 5, p. 1—11.
42. **Энергетические установки для космических аппаратов.** Пер. с англ. Под ред. Д. Д. Невяровского. М., «Мир», 1964, с. 340—348.
43. **Миллионщиков М. Д. и др.** Доклад № P/873 СССР, представленный на III Международную конференцию по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1964, с. 146—154.
44. **Idnirm M., Landever K.** Changes produced in thermoelectric materials by thermal neutron irradiation. — *«Brit. J. Appl. Phys.»*, 1967, v. 18, No. 8, p. 1209—1211.
45. **Правдюк Н. Ф. и др.** Влияние реакторного облучения на термопарные материалы. — *«Атомная энергия»*, 1968, т. 26, вып. 3, с. 233—235.
46. **Полищук В. Ф. и др.** Влияние реакторного облучения на термоэлектрические материалы. — *«Физика и техника полупроводников»*. т. 2, вып. 5, с. 707—713.
47. **Вавилов В. С.** Действие излучений на полупроводники. М., Физматгиз, 1963, с. 206—253.

К г л а в е 5]

1. **Воронин А. Н., Гринберг Р. З.** Способ брикетирования ветвей термоэлементов с последующей термообработкой из сплавов $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{—Sb}_2\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{—Bi}_2\text{Se}_3$. — В сб. «Термоэлектрические свойства полупроводников» (Труды I и II совещаний по термоэлектричеству). М. — Л., Изд-во АН СССР, 1963, с. 117.
2. **Малевский Ю. Н., Охотин А. С.** Исследование полупроводниковых термоэлементов. — В сб. «Теплоэнергетика». Вып. 2. М., Изд-во АН СССР, 1960, с. 78.
3. **Амбарцумян Р. С. и др.** Зачехление ТЭЭЛ и исследование модулей *n*- и *p*-типа на основе некоторых халькогенидов. — *«Гелиотехника»*, 1968, № 1, с. 56.

4. Шеклер А. Патент США № 3035109, 1962.
5. Space Aeronautics, 1968, v. 50, No. 1, p. 93.
6. Фриттс Р. Патент Великобритании № 882869, 1961.
7. Черкасский А. Х. Авторское свидетельство СССР № 107467. «Бюл. изобрет.», 1957, № 7.
8. Лидоренко Н. С. и др. Авторское свидетельство СССР № 169620. «Бюл. изобрет.», 1965, № 7.
9. Абдулаев Г. В. и др. Полупроводниковый солнечный ТЭГ с разновысокими термоэлементами. — «Гелиотехника», 1968, № 5, с. 3.
10. Лукомский С. М. и др. Термоэлектрические нагревательные и охлаждающие устройства. — «Гелиотехника», 1968, № 1, с. 56.
11. Иоффе А. Ф., Болтакс Б. И. Авторское свидетельство СССР № 95801. «Бюл. изобрет.», 1953, № 8.
12. Попов М. М. Термометрия и калориметрия. М., Изд-во МГУ, 1954, с. 25.
13. Тарнижевский Б. В. Возможности применения полупроводниковых преобразователей солнечной энергии в южных районах СССР. — В сб. «Теплоэнергетика». Вып. 3. М., Изд-во АН СССР, 1961, с. 7.
14. Астахов О. П. Авторское свидетельство СССР № 181699. «Бюл. изобрет.», 1966, № 10.
15. Баргнофф С. Патент США № 3005766, 1961.
16. Симановский Л. М. Термоэлементы на ядерном топливе. — В сб. «Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую». Информ. бюл. М. — Л., Изд-во АН СССР, 1970, вып. 3, с. 111.
17. Ганин Е. А., В. Ф. Лебедев и др. Расчет температурного поля в тепловом безызоляционном генераторе. — «Теплотехника высоких температур», 1968, № 1, с. 194.
18. Привин М. Р., Чудновский А. Ф. Двухмерное температурное поле полупроводниковой термоэлектрической батареи. — «Информ. физ. журн.», 1966, т. 10, № 2, с. 252.
19. Варшавский Г. А., Резголь И. А. Тепловой расчет термогенератора при переменных температурах вдоль теплоконтактных поверхностей. — «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1964, № 6, с. 735.
20. Косолапова Э. Ф., Милевская Н. Г. Коэффициент линейного расширения некоторых материалов для полупроводниковых термоэлементов. — В сб. «Теплоэнергетика». Вып. 3. М., Изд-во АН СССР, 1961, с. 58.
21. Schmerzler Z. I. Thermoelectric generators: status 1963 — «Semiconductor Products», 1963, v. 6, No. 4, p. 39.
22. Эрзин Н. И., Маков Н. В. Коммутация термоэлектрических ветвей в термоэлектрических устройствах. — В сб. «Теплоэнергетика». Вып. 5. М., Изд-во АН СССР, 1965, с. 32.
23. Иорданишвили Е. К. Термоэлектрические источники питания. М., «Советское радио», 1968, с. 77.
24. Воронин А. Н. Полупроводниковые термоэлектрические генераторы. Изд-во Ленинград. Дома науч.-техн. пропаганды, 1957, с. 39.
25. Арифов У. А. и др. Коммутация термоэлементов на основе тройных сплавов Bi_2Te_3 — Bi_2Sb_3 и Bi_2Te_3 — Sb_2Te_3 . — «Гелиотехника», 1968, № 3, с. 15.
26. Ритч Л. Патент США № 3232719, 1966.
27. Драбкин Л. М. и др. О коммутации термоэлементов. — «Гелиотехника», 1967, № 4, с. 3.
28. Алатырцев Г. А. и др. Применение гальванических покрытий при коммутации термоэлементов. Некоторые коммутационные припои для средне-температурных термоэлементов. — В сб. «Преобразователи солнечной энергии на полупроводниках». М., «Наука», 1968, с. 56.
29. Matlow S. Z., Ralph E. L. A low resistance contact for silicon semiconductor devices. — «Sol. State Electron.», 1961, v. 2, No. 4, p. 202.
30. Боровикова Р. П. Высокотемпературные термоэлементы для ТЭГ на основе сплава кремний — германий. — В сб. «Прямое преобразование

тепловой энергии в электрическую и топливные элементы.» Информ. бюл. М., Изд-во АН СССР, 1968, вып. 8, с. 79.

31. Иорданишвили Е. К. Авторское свидетельство СССР № 134736. «Бюл. изобрет.», 1961, № 1.
32. Алатырцев Г. А. и др. Авторское свидетельство СССР № 193586. «Бюл. изобр.», 1967, 7.
33. Черкасский А. Х. Напряжения и к. п. д. термогенератора. — «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1967, № 3, с. 45.
34. Барышников Г. А., Лошкарев А. И. Коммутирование низковольтных электрогенерирующих элементов в системе источника тока повышенного напряжения. — «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1968, № 5, с. 123.
35. Справочник электрика промышленных предприятий. Под ред. А. А. Федорова и В. П. Кузнецова. М. — Л., Госэнергоиздат, 1954, с. 936.
36. Займовский А. С. и др. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов. Изд. 2-е. М., Атомиздат, 1966, с. 28.
37. Костюков Н. С. и др. Изоляционные материалы для работы в потоках тепловых нейтронов. — «Теплофизика высоких температур», 1967, № 2, с. 361.
38. Macavoy T., Nababy S. Substance for fine—film circuit. — «IEEE Trans. Component Parts», 1964, v. 2, No. 1, p. 15.
39. Болтакс Б. И. и др. Диффузия в термоэлектрических материалах. — В сб. «Термоэлектрические свойства полупроводников» (Труды I и II совещаний по термоэлектричеству). М. — Л., Изд-во АН СССР, 1963, с. 3.
40. Воронин А. Н. и др. Предохранение отрицательной ветви термоэлемента от старения. — В сб. «Термоэлектрические свойства полупроводников» (Труды I и II совещаний по термоэлектричеству). М. — Л., Изд-во АН СССР, 1963, с. 123.
41. Пашинкин А. С., Новоселова А. В. и др. Упругость паров некоторых термоэлектрических материалов. — «Журн. неорг. химии», 1959, № 2, с. 2657.
42. Burgess I., Milligan N. Maximum utilisation of thermoelectric materials. — «IEEE Trans. Aerospace», 1964, v. 2, No. 2, p. 722.
43. Ядзак Токехито. Японский патент № 22680, 1964.
44. Маликов И. М. Надежность судовой электронной аппаратуры и систем автоматического управления. М., «Судостроение», 1967, с. 9.
45. Махлин А. Г., Хазанов М. Г. Надежность полупроводниковых термоэлектрических устройств. — «Гелиотехника», 1969, № 2, с. 65.
46. Toomb D. N. Reliability and circuit analysis for thermopiles with redundant elements. — «IEEE Trans. Nucl. Sci.», 1967, v. 14, No. 4, p. 17.

К главе 6

1. Даниель-Бек В. С., Рогинская Н. С. Термоэлектрические генераторы М., «Связьиздат», 1961, с. 19.
2. Соминский М. С. Солнечная электроэнергия. М. — Л., «Наука», 1965, с. 180.
3. Иорданишвили Е. К. Термоэлектрические источники питания. М., «Советское радио», 1968, с. 96.
4. Воронин А. Н. Полупроводниковые термоэлектрические генераторы. Изд-во Ленинград. Дома науч.-техн. пропаганды, 1957, с. 21.
5. Соминский М. С. Полупроводники. М. — Л., «Наука», 1967, с. 392.
6. Бернштейн А. С. Термоэлектрические генераторы. М. — Л., Госэнергоиздат, 1956, с. 37.
7. Бернштейн А. С. Термоэлектричество. М., Гостехиздат, 1957, с. 43.
8. Herchakowski A. 100 watt thermoelectric generator development. — «Proc. 20-th the Annual Power Sources. Conf.». N. J., PSC Publ. Comm., 1966, p. 155.

9. Ein tragbarer thermoelektrischer generator. — «Electrotechn. Zeit.», 1962, B14, No. 26, S. 709.
10. Neild A. B. Thermoelectric generators for military portable power. «SAE preprints», 1967, No. 670, p. 10.
11. Алексеев Г. Н. Непосредственные превращения разных видов энергии в электрическую и механическую. М. — Л., Госэнергоиздат, 1963, с. 106.
12. Профрансов В. П., Лебедев П. Н. Защита подземных сооружений от коррозии. М., Стройиздат, 1968, с. 3.
13. Кесельман Г. С. Применение ТЭГ для катодной защиты подземных металлических сооружений. М., Изд-во ЦНИИнефтегаз, 1964, с. 45.
14. Thermoelectric generators fuelled by natural gas. — «Petrol. — Ind. Electr. News», 1966, v. 34, No. 8, p. 47.
15. Линус С. Катодная защита с применением термогенератора. — «Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую». Информ. бюл. М., Изд-во АН СССР, 1963, вып. 9, с. 63.
16. Тарнижевский Б. В. Возможности применения полупроводниковых преобразователей в южных районах СССР. — В сб. «Теплоэнергетика». Вып. 3. М., Изд-во АН СССР, 1961, с. 7.
17. Теллес М. Солнечные термоэлектрические генераторы. — В сб. «Полупроводниковые преобразователи солнечной энергии». Пер. с англ. Под ред. Ю. П. Маслакова и В. К. Субашнева. М., Изд-во иностр. лит., 1959, с. 337.
18. Арифов У. А., Кулагин А. И. Термоэлектрические преобразователи тепловой энергии в электрическую. — «Гелиотехника», 1965, № 1, с. 6.
19. Egli P. Progress in Thermoelectricity. — «IRE Trans. Milit. Electron», 1962, v. 6, No. 1, p. 27.
20. Гаибназаров М. и др. Энергетические характеристики солнечного термоэлектродгенератора. — В сб. «Преобразование солнечной энергии на полупроводниках». М., «Наука», 1968, с. 13.
21. Апарин Р. Р., Гарф Б. А. Использование солнечной энергии. М., Изд-во АН СССР, 1958, с. 43.
22. Алатырцев Г. А. и др. Солнечный ТЭГ мощностью 10 Вт. — В сб. «Теплоэнергетика». Вып. 3. М., Изд-во АН СССР, 1961, с. 73.
23. Алатырцев Г. А. и др. Экспериментальный солнечный термогенератор. — В сб. «Преобразование солнечной энергии на полупроводниках». М., «Наука», 1968, с. 7.
24. Баум В. А. и др. Доклад СССР № 1, представленный на VII конгресс Мировой энергетической конференции. Москва, август 1968.
25. Арифов У. А., Кулагин А. И. Некоторые вопросы гелиотехники в СССР. — «Гелиотехника», 1968, № 3, с. 5.
26. Тепляков Д. И. и др. Калориметрические исследования концентратора солнечной термоэлектрической водоподъемной установки. — В сб. «Преобразование солнечной энергии на полупроводниках». М., «Наука», 1968, с. 109.
27. Воронин А. Н. Авторское свидетельство СССР № 123378. «Бюл. изобрет.», 1959, № 20.
28. Акрамов Х. Т. и др. Оптимизация весовых и энергетических характеристик солнечного термогенератора с естественным охлаждением. — «Гелиотехника», 1966, № 3, с. 6.
29. Арифов У. А. и др. Солнечный генератор с цилиндрическим гелиоприменением. — «Гелиотехника», 1967, № 3, с. 3.
30. Glassburn C. W. High temperature thermoelectric research. — «IEEE Trans. Aerospace», 1964, v. 2, No. 2, p. 711.
31. Ронклоу П. Состояние разработки солнечных термоэлектрических систем. — «Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую и топливные элементы». Информ. бюл. М., Изд-во АН СССР, 1966, вып. 9, с. 87.

32. Solar cells continue in lead as most reliable solar energy conversion device. — «Missiles and Rockets», 1964, v. 14, No. 22, p. 52.
33. Fenity R. D. Oxide thermoelectric generator. — «Electronics», 1962, v. 35, No. 5, p. 39.
34. Фенити Р. Оксидные термоэлектрические генераторы. — В сб. «Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую». Информ. бюл. М., Изд-во АН СССР, 1962, вып. 3, с. 73.
35. Abowitz G. e. a. Thin-film thermoelectrics. — Semicond. «Prod. and Sol. State Technol.», 1965, v. 8, No. 2, p. 18.

К г л а в е 7

1. Фрадкин Г. М. и др. Изотопные источники электрической энергии для питания автоматических радиометрических станций. — «Атомная энергия», 1968, т. 24, вып. 2, с. 203—204.
2. Джингрич Дж. Термоэлектрические космические энергоустановки на радиоизотопах. — В сб. «Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую и топливные элементы». Информ. бюл. М., Изд-во АН СССР, 1965, вып. 2, с. 154—163.
3. Buck K. Undersea role for isotopic power. — «Nucleonics», 1966, v. 24, No. 6, p. 38—41.
4. Корлисс У., Харви Д. Источники энергии на радиоактивных изотопах. Пер. с англ. М., «Мир», 1967, с. 260—283.
5. Rimshaw S. Isotopic power data sheets. — «Isotop. and Rad. Techn.», 1965—1966, v. 3, No. 2, p. 147—151.
6. Lyon W. e. a. 100—to—1000 mW radioisotope generators. — «Nuclear Application», 1968, v. 4, No. 2, p. 79—87.
7. Лонг Л. и др. Снижение стоимости ядерной энергии за счет доходов от изотопов. — «Атомная техника за рубежом», 1968, № 8, с. 34—42.
8. English R. Project large scale use of radioisotopes by NASA. Paper of Symposium on Industrial Application of Isotope Generators, Harwell, September 1966.
9. Фрадкин Г. М., Кодюков В. М. Радиоизотопные термоэлектрические генераторы. — «Атомная энергия», 1969, т. 26, вып. 2, с. 169—175.
10. Черкасский А. Х. Тепловые изоляторы для термоэлектрических преобразователей энергии. — «Электротехника и энергетика», 1969, 8A165.
11. Эдвардс Д. Спектральные и угловые характеристики теплового излучения поверхностей для сброса тепла. — В сб. «Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую и топливные элементы». Инф. бюл. М., Изд-во АН СССР, 1966, вып. 11, с. 105—114.
12. Козлов В. Ф., Трошкин Ю. С. Справочник по радиационной безопасности. М., Атомиздат, 1967, с. 58—65.
13. Воронин А. Н. и др. Доклад Nr/318 СССР, представленный на III Международную конференцию по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1964, т. 15, с. 176—184.
14. Radioisotope thermoelectric generator for use to 2000 ft undersea. — «Design News», 1966, v. 21, No. 17, p. 136.
15. An 25 watt undersea radioisotope generator. — «Nucl. Engng», 1968, v. 13, No. 146, p. 563.
16. Lafferty R. Radioisotope — powered submersible engine. — «Isot. and Rad. Techn.», 1967—1968, v. 5, No. 2, p. 148—154.
17. Isotopic thermoelectric generators. — «Atom», 1968, No. 137, p. 65—67.
18. Келдыш М. В. В сб. «Октябрь и научный прогресс». М., Изд-во Агентства печати Новости, 1967, кн. 1, с. 87—167.
19. Петросьянц А. М. Ядерная энергетика и мирное применение атомной энергии. — В сб. «Развитие физики в СССР». Под ред. Л. А. Арцимовича. М., «Наука», 1967, кн. 2, с. 300—328.
20. Gingham R. Radioisotope fuelled thermoelectric space power systems. — «IEEE Trans. Aerospace», 1964, v. 2, No. 2, p. 669—674.

21. **Cohen M.** Application of the SNAP-27 radioisotope power generator to the Apollo mission. — «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1966, v. 9, No. 1, p. 164.
22. **Сиборг Г.** Избранное семейство трансуранов. — «Природа», 1969, № 7, с. 18—23.
23. **SNAP power** for manned missions. — «Nucl. News», 1967, v. 10, No. 1, p. 9.
24. **Morse J.** Isotopic power in Europe. — «Nucl. News», 1966, v. 9, No. 5, p. 24—29.

К главе 8

1. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963, с. 458—475.
2. **Wolf E., Hang W.** Parametristudie über Thermische Reaktoren mit thermionischen Konvertern. — «Atomkernenergie», 1965, v. 10, Nr. 9—10, p. 333—345.
3. **Кутателадзе С. С. и др.** Жидкометаллические теплоносители. М., Атомиздат, 1958, с. 8—13.
4. **Бармат М.** Непосредственное преобразование энергии с использованием ядерных источников тепла. — В сб. «Термоэлектрические материалы и преобразователи». Пер. с англ. Под ред. А. И. Карчевского. М., «Мир», 1964, с. 289—333.
5. **Grover G. e. a.** Structures of very high thermal conductance. — «J. Appl. Phys.», 1964, v. 35, No. 6, p. 1990—1991.
6. **Scheidler M., Wöfner G.** Theoretisches Modell zum Wärmetransport in Wärmeübertragungsrohren. — «Atomkernenergie», 1965, v. 10, Nr. 9—10, p. 395—399.
7. **Busse R.** Experimental studies of heat pipes. Paper of the International conf. on thermoionic conversion. London, 1965.
8. **Grover G. e. a.** Experimental and theoretical studies of heat pipes at Los Alamos. Paper of the International conf. on thermoionic conversion. London, 1965.
9. **Feldman T., Whiting G.** The heat pipe. — «Mech. Engng», 1967, v. 89, No. 2, p. 30—33.
10. **Bierman H.** Army is developing 3 kw devices for field use. — «Electronic Design», 1966, v. 14, No. 16, p. 17—18.
11. **Ruchle R. e. a.** Verwendung von Wärmeübertragungsrohren für Thermoionik reaktoren. — «Atomkernenergie», 1965, v. 10, Nr. 9—10, p. 399—404.
12. **Anderson J. e. a.** A nuclear thermoionic space power using rod control and heat pipes. — «Nucl. Appl.», 1968, v. 5, p. 424—436.
13. **Third S. e. a.** Experimental thermoelectric generator. — «Proc. Instr. Electr. Engrs», 1963, v. 110, No. 10, p. 1829—1836.
14. **Миллионщиков М. Д. и др.** Высокотемпературный реактор-преобразователь «Ромашка» — «Атомная энергия», 1964, т. 17, вып. 5, с. 329—335.
15. **Reactor Handbook**, Materials. Edited by C. R. Tipton. New York — London, 1960, p. 994—1023.
16. **Тиль А., Кумбе М.** В кн. «Энергетические установки для космических аппаратов». Пер. с англ. Под ред. Д. Д. Неверовского. М., «Мир», 1964, с. 214—218.
17. **Кюзар П. и др.** Статическая термоэлектрическая система, использующая ядерную энергию для космоса. — В сб. «Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую». Информ. бюл. М., Изд-во АН СССР, 1963, вып. 16, с. 88—92.
18. **Дикамп Н. и др.** Доклад № P/218, США, представленный на III Международную конференцию по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1964, т. 15, с. 164—172.
19. **Hawley J., Flynn W.** SNAP-10A reactor analysis. — «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1965, v. 8, No. 1, p. 160.

20. **Perlow M., Davis K.** The development of the SNAP-10A thermoelectric pump. — «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1965, v. 8, No. 1, p. 160.
21. **Jonson R. e. a.** SNAP-10A, first reactor in space. — «SAE J.», 1966, v. 74, No. 3, p. 92—96.
22. **Maki L., Brager H.** Operating capabilities and growth potential of the SNAP-8 reactor. — «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1965, v. 8, No. 1, p. 161.
23. **Budney G.** Advanced SNAP reactor thermoelectric space power systems. — «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1966, v. 9., No. 2, p. 338.
24. **Eugen S., Karlheinz P.** Thermoelektrische Generatoren für die Energie Versorgung von Raum flugkörpern. — «Techn. Rundschau», 1966, v. 58, Nr. 28, p. 25—27.
25. **Патент США № 3118818**, кл. 176—39, 1964 г.
26. **Dufrance K.** An 100 kwe underwater thermoelectric reactor plant. — «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1963, v. 6, No. 2, p. 319—320.
27. **Murphy C.** P₄S₃ — cooled thermoelectric reactor plant. — «Trans. Amer. Nucl. Soc.» 1963, v. 6, No. 2, p. 320—321.
28. **Манасян Ю. Г.** Судовые термоэлектрические устройства и установки, Л., «Судостроение», 1968, с. 206—253.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Принятые обозначения и сокращения	5
Глава 1. Из истории развития термоэлектрических генераторов	7
Глава 2. Расчеты термоэлементов	14
§ 2.1. Основные термоэлектрические явления	14
§ 2.2. Баланс энергии в ТЭЭЛ	17
§ 2.3. Оптимизация к. п. д. простейшего ТЭЭЛ	24
§ 2.4. ТЭЭЛ с переменным составом ветвей	28
§ 2.5. Расчет ТЭЭЛ	34
Глава 3. Схемы установок ТЭГ	39
§ 3.1. Тепловая эффективность установок ТЭГ	39
§ 3.2. ТЭГ с рекуперацией тепла	40
§ 3.3. ТЭГ для получения переменного тока	42
§ 3.4. ТЭГ с пониженной температурой холодных спаев	44
§ 3.5. Короткозамкнутый ТЭГ	47
§ 3.6. Термоэлектрический насос	48
§ 3.7. ТЭГ в сочетании с термоэлектрическим холодильником	49
§ 3.8. ТЭГ в сочетании с фотоэлементами, термоэмиссионными диодами и паровым циклом	51
Глава 4. Термоэлектрические материалы	53
§ 4.1. Общая часть	53
§ 4.2. Твердые термоэлектрические материалы	56
§ 4.3. Некоторые вопросы изготовления твердых термоэлектриков	68
§ 4.4. Жидкие термоэлектрические материалы	70
§ 4.5. Действие ядерных излучений на термоэлектрические материалы	73
Глава 5. Конструктивные схемы и особенности ТЭЭЛ	79
§ 5.1. Конструктивные схемы ТЭЭЛ	79
§ 5.2. Температурные поля и напряжения в ТЭЭЛ	93
§ 5.3. Контактные сопротивления	95
§ 5.4. Электрическая изоляция батареи ТЭЭЛ	102
§ 5.5. Старение и сублимация ТЭЭЛ	103
§ 5.6. Удельная мощность ТЭЭЛ	106
§ 5.7. Надежность работы батареи ТЭЭЛ	107

Глава 6. ТЭГ на химическом (органическом) топливе, солнечной энергии и некоторых других источниках тепла	109
§ 6.1. Общая часть	109
§ 6.2. ТЭГ на твердом топливе	110
§ 6.3. ТЭГ на жидком топливе	114
§ 6.4. ТЭГ на газообразном топливе	125
§ 6.5. ТЭГ на солнечной энергии (без концентраторов)	128
§ 6.6. Солнечные ТЭГ с концентраторами	131
§ 6.7. ТЭГ с некоторыми другими источниками тепла	139

Глава 7. Радиоизотопные термоэлектрические генераторы	142
--	------------

§ 7.1. Радиоизотопная энергетика	142
§ 7.2. Радиоактивные изотопы как источники тепла	145
§ 7.3. Конструктивные особенности изотопных термогенераторов	152
§ 7.4. Наземные изотопные термогенераторы	165
§ 7.5. Изотопные термогенераторы для космоса	181

Глава 8. Реакторные термогенераторы	203
--	------------

§ 8.1. Общая часть	203
§ 8.2. Реакторные установки с термоэлектрическим циклом	204
§ 8.3. Реакторные термогенераторы космического назначения	217
§ 8.4. Реакторные термогенераторы для работы под водой	240

Список литературы	250
-----------------------------	-----